

설계강우량의 최적 설계에 관한 연구

A Study on Optimal Design Storm

○ 이 동 진* · 허 준 행** · 조 원 철***
Lee, Dong Jin · Heo, Jun Haeng · Cho, Won Cheol

1. 서론

미계측유역의 유출량산정을 위한 설계강우 지속시간의 선택은 대상유역의 크기, 강우지속기간의 특성, 홍수유출 형태, 그리고 계획대상 시설의 종류등을 명확히 고려하여 결정하는 것이 원칙이다. 기존의 설계기준에 의하면, 유역의 홍수소통용 구조물을 설계시 설계강우의 지속시간은 유역의 홍수도달시간으로 결정하며, 홍수저류용 수공구조물을 설계할 때의 설계강우지속시간은 유역에 내리는 강우의 첨두유출량이 최대가 되는 임계지속시간을 채택하도록 되어 있지만, 유역의 홍수도달시간은 동일한 유역이라도 공식별로 서로 큰 차이를 보이고 있으며, 외국의 실정을 반영한 경험식으로 우리나라 유역에서 적용할 수 있는 도달시간에 대한 일반적인 공식이 정립되어 있지 않다. 한편, 유역하류부에 홍수저류용 구조물의 설계를 위해 첨두유출량에 대한 임계지속시간을 사용하는 경우에는, 저류지 방류공의 설치에 따르는 저류지 방류량의 변화를 고려하지 못하므로 토지이용도상 저류지의 규모가 한정될 수 밖에 없는 상황에 대해 적절하게 대처하지 못할 수도 있다. 본 연구에서는 자연방류형 저류지의 설계시 홍수도달시간과 구조물에 최대의 부하가 걸리는 임계지속시간을 비교, 검토하고 이를 토대로 적정한 설계강우지속시간을 산정하고자 한다.

2. 유출량 해석

2.1 강우지속시간별 유출량산정

본 연구에서는 제주시 봉개동에 위치하고 있는 봉개자연휴양림 사업지구를 대상유역으로 선정, 유출해석을 실시하였다. 대상유역의 면적은 1,838 km², 유로연장은 2,229 km, 유역경사는 0.1152이며 최근 산정된 제주지점의 확률강우강도식을 이용하였다. 유역특성을 감안하여 재현기간은 50년으로 설정하였고($I = \frac{332.892}{t^{0.479276}}$, I : 강우강도, t : 강우지속시간(min)), SCS 유효우량산정법을 이용하여 유효우량을 산정하였다. 이를 위하여 대상유역의 토지이용도를 이용, 개발전·중·후에 대한 CN값을 각각 76.716, 85.927, 82.549로 산정하였으며, SCS 합성단위도법을 통한 표 2와 같은 강우지속시간별 개발 전·중·후 유역에 대한 유출량을 산정하였다.

* 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

** 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*** 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

표 1. SCS 합성단위도법을 이용한 강우지속변화에 따른 유출량의 변화(30분단위)

지속시간 (분)	강우강도 (mm/hr)	유효우량			개발전		개발중		개발후		개발중-개발전	
		개발전	개발중	개발후	Q _p	Q _T	Q _p	Q _T	Q _p	Q _T	Q _p	Q _T
30	102.58	11.39	21.83	17.45	3.79	14959	13.29	40099	9.89	32044	9.50	25141
60	72.89	24.55	39.27	33.34	6.94	35686	17.09	72126	13.78	61241	10.16	36440
90	59.69	36.32	53.70	46.86	8.67	55017	18.19	98628	15.24	86058	9.52	43612
120	51.79	47.04	66.31	58.83	9.67	72972	18.39	121793	15.78	108047	8.72	48821
150	46.40	56.94	77.67	69.70	10.26	89777	18.23	142655	15.90	128018	7.97	52879
180	42.41	66.18	88.09	79.74	10.61	105620	17.92	161800	15.83	146454	7.31	56180
210	39.31	74.89	97.79	89.11	10.81	120653	17.55	179600	15.66	163670	6.74	58947
240	36.80	83.16	106.88	97.94	10.92	134989	17.17	196308	15.43	179885	6.25	61319
270	34.73	91.03	115.49	106.31	10.97	148721	16.79	212107	15.18	195259	5.82	63386
300	32.97	98.58	123.67	114.29	10.97	161920	16.41	227132	14.93	209913	5.45	65213
330	31.46	105.83	131.48	121.93	10.94	174646	16.06	241490	14.67	223942	5.12	66844
360	30.14	112.82	138.98	129.27	10.89	186948	15.72	255262	14.42	237421	4.83	68314
390	28.97	119.57	146.20	136.34	10.83	198867	15.39	268516	14.17	250411	4.57	69650
420	27.93	126.12	153.16	143.17	10.75	210437	15.09	281308	13.93	262962	4.33	70871
450	27.00	132.47	159.90	149.79	10.67	221689	14.80	293683	13.71	275117	4.12	71994
480	26.15	138.65	166.43	156.21	10.59	232648	14.52	305680	13.49	286912	3.93	73031
510	25.38	144.66	172.78	162.46	10.50	243337	14.26	317332	13.27	298378	3.76	73995
540	24.68	150.53	178.95	168.53	10.41	253775	14.01	328667	13.07	309541	3.60	74893
570	24.03	156.25	184.96	174.46	10.32	263979	13.78	339711	12.88	320424	3.46	75733
600	23.43	161.85	190.83	180.24	10.23	273965	13.55	350485	12.69	331047	3.32	76520
630	22.87	167.33	196.56	185.90	10.14	283747	13.34	361009	12.51	341429	3.20	77262
660	22.35	172.69	202.16	191.43	10.05	293336	13.14	371298	12.34	351586	3.09	77962
690	21.87	177.95	207.64	196.84	9.96	302745	12.94	381368	12.18	361532	2.98	78623
720	21.41	183.11	213.01	202.15	9.87	311983	12.76	391233	12.02	371279	2.88	79250
750	20.99	188.18	218.28	207.35	9.79	321060	12.58	400906	11.87	380840	2.79	79846
780	20.59	193.15	223.45	212.46	9.71	329983	12.41	410396	11.72	390224	2.70	80413
810	20.21	198.05	228.52	217.48	9.62	338761	12.24	419714	11.58	399441	2.62	80953
840	19.85	202.86	233.51	222.41	9.54	347401	12.09	428870	11.44	408500	2.55	81469
870	19.51	207.59	238.41	227.27	9.46	355908	11.94	437870	11.31	417410	2.47	81962
900	19.18	212.25	243.23	232.04	9.39	364290	11.79	446724	11.18	426176	2.41	82434
930	18.88	216.85	247.97	236.74	9.31	372551	11.65	455438	11.06	434807	2.34	82887
960	18.58	221.37	252.64	241.37	9.24	380697	11.52	464019	10.94	443308	2.28	83322
990	18.30	225.84	257.25	245.93	9.16	388733	11.39	472473	10.83	451684	2.22	83740
1020	18.04	230.24	261.78	250.42	9.09	396663	11.26	480805	10.72	459942	2.17	84142
1050	17.78	234.58	266.26	254.86	9.02	404490	11.14	489020	10.61	468086	2.12	84529
1080	17.53	238.87	270.67	259.23	8.96	412220	11.02	497123	10.51	476122	2.07	84903
1110	17.30	243.10	275.02	263.55	8.89	419856	10.91	505119	10.40	484052	2.02	85263
1140	17.07	247.28	279.32	267.81	8.83	427401	10.80	513013	10.31	491881	1.97	85612
1170	16.86	251.42	283.56	272.02	8.76	434858	10.69	520806	10.21	499614	1.93	85948
1200	16.65	255.50	287.75	276.18	8.70	442231	10.59	528505	10.12	507254	1.89	86274
1230	16.45	259.53	291.89	280.29	8.64	449522	10.49	536111	10.03	514803	1.85	86590
1260	16.25	263.53	295.99	284.36	8.58	456734	10.39	543629	9.94	522265	1.81	86895
1290	16.06	267.47	300.03	288.37	8.52	463869	10.30	551061	9.86	529644	1.78	87192
1320	15.88	271.38	304.04	292.35	8.46	470931	10.21	558410	9.77	536941	1.74	87479
1350	15.71	275.25	307.99	296.28	8.41	477921	10.12	565679	9.69	544160	1.71	87758
1380	15.54	279.07	311.91	300.17	8.35	484841	10.03	572871	9.61	551302	1.68	88030
1410	15.38	282.86	315.78	304.01	8.30	491694	9.94	579988	9.54	558372	1.65	88293
1440	15.22	286.61	319.62	307.82	8.25	498482	9.86	587032	9.46	565370	1.62	88550

2.2 자연방류형 저류지의 설계

일반적으로 유역의 하류부에 설치하는 수조형식의 여수로나 방수로에 수문이 없는 자연방류식 임시저류지의 경우 유출량 O 및 저류량 S는 다음과 같이 수면 h의 함수로 표시할 수 있다.

$$\frac{1}{2} (I_1 + I_2) \Delta t + (S_1 - \frac{1}{2} O_1 \Delta t) = A_R \times h + \frac{1}{2} C_0 \left(\frac{\pi D}{4} \right)^2 \sqrt{2gh} \quad (1)$$

여기서, I₁은 임의시간 Δt 시점에서의 유입량, I₂는 임의시간 Δt 종점에서의 유입량, O₁은 임의시간 Δt 시점에서의 유출량, O₂는 임의시간 Δt 종점에서의 유출량, S₁은 임의시간 Δt 시점에서의 저류량, S₂는 임의시간 Δt 종점에서의 저류량, Δt는 추적기간 (routing period), C₀는 오리피스 유량계수(0.6), A는 방류구의 단면적, g는 중력가속도이다.

방류공을 통한 방류량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 방류공의 제원이며, 일반적으로 방류공의 제원이 커지면 유출량은 커진다. 본 연구에서는 개발전의 상태유치라는 재해영향평가의 취지에 입각하여 방류공을 통하여 방류되는 유출량에 대해 개발전 침투유출량을 통과시킬 수 있도록, 방류공의 제원을 결정함으로써 안전율을 확보하도록 하며 저류지의 수심은 일반적으로 시공상 가능한 5m로 제한하였다. 따라서 침투유출량이 최대가 될 때를 기준으로 유출량을 산정하고 그 때의 개발전과 개발중의 유출량의 차이를 저류지의 용량으로 결정하였다.

3. 설계강우지속시간의 결정

3.1 홍수 도달시간

홍수 도달시간이란 유역의 물리적 특성을 가지고 침투유출을 산정하는데 대단히 중요한 인자로서, 유역에서 수리학적으로 가장 먼 곳에 내린 물입자가 유역 출구점(또는 설계지점)까지 도달하는 데 걸리는 시간이다. 유역의 도달시간은 유역의 특성에 따라 여러 인자들의 복합적인 영향으로 말미암아 특성화, 일반화된 대표적인 식은 아직까지 없으며 다만 외국에서 개발된 실험이나 경험에 의한 공식들을 이용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 대상유역에 대하여 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 5가지의 대표적인 홍수도달공식을 이용하여 홍수 도달시간을 산정하였으며, 표 2와 같다. 기존의 설계기준에 제시된, 홍수소통용 구조물 설계시 홍수 도달시간의 사용은 표 2에서 나타난 것과 같이 공식마다 그 결과가 서로 상이하기 때문에 일반적인 기준을 제시할 수가 없으므로 따라서 설계강우의 지속시간으로는 적합하지 않다고 판단된다.

표 2. 홍수 도달시간공식을 이용한 대상유역의 도달시간 산정 (개발중)

홍수 도달시간공식		홍수도달시간(분)	비 고
Kirpich	$T_c = \frac{3.976L^{0.77}}{S^{0.385}}$	16.94	L: 유역의 주유로를 따라 측정한 유로연장(km) S: 유역의 평균경사(H/L, m/m)
Kirby	$T_c = \frac{36.255(L \cdot N)^{0.467}}{S^{0.2335}}$	29.92	L: 유로의 최원점부터 하천유입부분까지의 직선거리(km) S: 유로의 평균경사(m/m) N: 유역의 조도를 나타내는 무차원 상수 (개발중 N = 0.1)
Rizha	$T_c = \frac{0.833L}{S^{0.6}}$	6.79	L: 유로길이(km) S: 유역의 평균경사(H/L, m/m)
Kraven1	$T_c = \frac{0.444L}{S^{0.515}}$	3.01	L: 유로길이(km) S: 유역의 평균경사(H/L, m/m)
Kraven2	$T_c = 16.667 \frac{L}{V}$	10.61	V: 유속(m/s), 3.5 (S ≥ 0.01) 3.0 (0.01 ≤ S ≤ 0.01) 2.1 (0.05 ≤ S)

3.2 임계지속시간

1) 침투유출량이 최대로 되는 임계지속시간

표 1에서와 같이 강우지속시간이 길어짐에 따라 침투유출량이 증가하나 어떤 특정지속시간 이후로는 감소하는 양상을 나타냄으로 임계값의 선정이 분명하고 합리적이라는 장점이 있다.

본 대상유역의 경우 CN값의 변화로 인한 침투유출량은 개발중이 개발후보다 큰 값을 가지는

것으로 나타났으므로, 개발중의 침투유출량이 최대가 되는 강우지속시간을 임계지속시간으로 선정하였다. 표 1에서 제시한 개발중의 30분단위 침투유출량의 최대값은 120분에서 발생하는 것으로 나타났다. 정확한 산정을 위하여 90분부터 150분까지 지속시간간격을 10분단위로 세분화하여 산정한 침투유출량을 표 3에 도시하였으며, 그림 1과 같다. 개발전에는 강우지속시간 270분, 개발중에는 120분에서 최대침투량이 발생하며, 개발중의 침투량이 상대적으로 크기 때문에 임계지속시간으로 120분을 산정하였다.

표 3. 강우지속시간변화에 따른 침투유출량의 변화

지속시간 (분)	개발전 (cms)	개발중 (cms)	개발후 (cms)
60	6.94	17.09	13.78
70	7.63	17.63	14.43
80	8.20	17.97	14.90
90	8.67	18.19	15.24
100	9.06	18.32	15.49
110	9.39	18.38	15.66
120	9.67	18.39	15.78
130	9.90	18.36	15.85
140	10.09	18.30	15.89
150	10.26	18.23	15.90

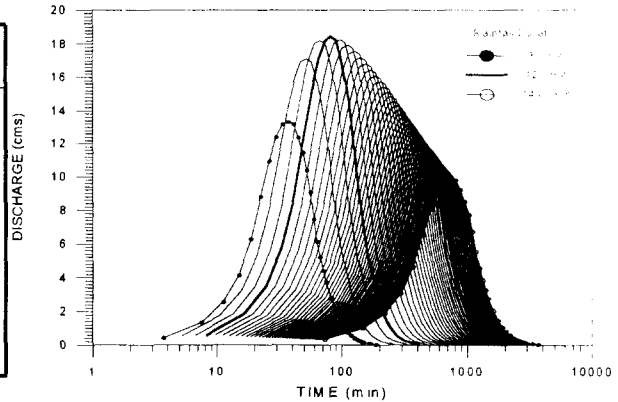


그림 1 강우지속시간변화에 따른 유출량변화

2) 유출총량차이에 대한 임계지속시간 산정

표 1에서와 같이 개발중과 개발전의 유출총량의 차는 강우지속시간이 변화함에 따라서 계속 증가한다. 강우지속시간에 따른 유출총량에 대한 임계지속시간은 24시간으로 산정하였다. 본 연구에서 50년 설계빈도를 적용하였음을 고려할 때 저류시설에서 과잉설계가 되어 안전할 수는 있으나 비효율적이므로 이를 임계지속시간으로 산정하는 것은 타당하지 않다.

3) 저류지를 고려한 임계지속시간의 산정

선정된 저류지에 대하여 저류량과 저류비를 이용하여 임계지속시간을 산정한다. 선정된 자연방류형 저류지에 대해 유역의 유출에 기인한 유입량은 저류지의 지체효과 및 저류효과로 말미암아 방류관을 통하여 방류될 때에는 침투유출량이 발생하는 시간이 상대적으로 길어지는 현상을 보인다. 저류지의 용적이 한정되어 있는 이유로 인하여 강우지속시간이 길어지고 강우량이 많아짐에 따라 저류지에 저류되는 양이 반드시 증가하는 것은 아니다. 본 연구에서는 이러한 저류량의 변화를 강우지속시간에 따라 비교하여, 이 값이 최대가 되는 임계지속시간을 산정하였다. 한편, 기존의 강제펌프장에 대하여 고려되었던 저류비를 이용한 임계지속시간산정에 관한 연구에서 제시되었던 저류비를 사용하여 저류량과 유입량을 비로 나타내어 무차원화를 시키고, 이를 저류비로 정의함으로써 강우지속시간에 대해 변화를 고려하기로 한다(이재준 등, 1993). 임계지속시간은 이러한 저류비가 최대로 될 때의 강우지속시간으로 정의하고자 한다.

(1) 저류량을 고려한 임계지속시간의 설정

그림 2와 같이 빗금친 부분에 해당하는 유입수문곡선과 유출수문곡선의 차이는 저류지가 허용할 수 있는 저류량이며, 본 연구에서는 저류량에 영향을 미치는 방류공의 체원과 허용수심을 기준

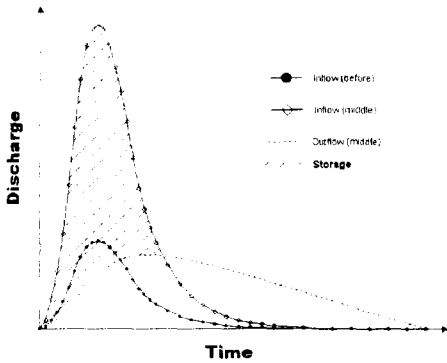


그림 2. 저류량과 유입·유출수문곡선과의 관계

첨두유출량을 초과하지 않는 최소허용방류공을 선택하여 이를 기준으로 저류량을 비교하여 임계지속시간을 선정하였다. 방류공의 단면이 줄어들면 저류지수심은 증가하게 되므로 초기의 저류용량을 초과하는 단점이 있으며 따라서 저류지수심의 허용범위는 무한하다고 가정하였다. 최소허용방류공은 0.5m부터 0.1m씩 변화시켜 적용해 본 결과 1.0m로 채택하였고, 10분씩 변화시키면서 그때의 저류량의 변화량을 산정한 결과 그림 3과 같으며, 임계지속시간은 1200분으로 선정하였다.

② 최대허용방류공을 이용한 임계지속시간의 선정

최소허용방류공을 채택하여 저류량을 계산하면 그 수심이 매우 커지므로 저류지수심이 5m가 넘지 않도록 최대첨두방류량을 기준으로 방류공을 선정하였다. 이 경우 모든 강우지속기간변화에 대해 저류용량을 초과하지 않는 장점이 있으나 강우지속기간이 길어짐에 따라 저류지를 통한 방류량이 개발전 첨두유출량보다 커지는 단점이 있다. 저류량의 변화는 그림 4과 같고 임계지속시간은 330분으로 선정하였다.

으로 두가지 방법에 의해 저류량에 대한 임계지속시간을 산정하고자 한다.

① 최소허용방류공을 이용한 임계지속시간의 선정

강제배수의 경우에는 펌프에 의하여 일정한 유량이 방류되는데 반해 자연방류형저류지는 각 강우지속기간에 따라 방류되는 첨두량이 서로 다르다. 개발전의 첨두유출량을 초과하지 않아야 하므로 방류공설계시 각 강우지속기간별로 체원이 서로 다르게 되어 일관된 비교검토가 이루어 질 수 없으므로, 강우지속기간별 일관된

비교검토를 위해 모든 강우지속기간에 대해 개발전의

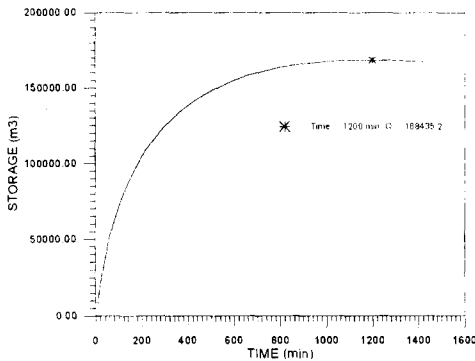


그림 3. 저류량을 이용한 임계지속시간의 선정

(최소방류량기준)

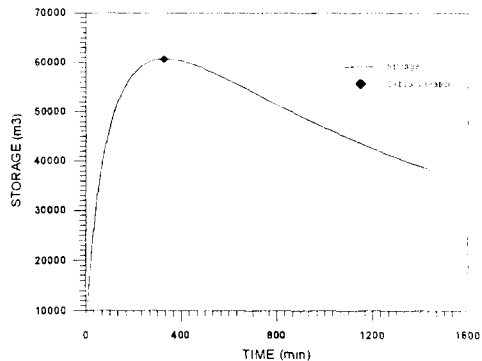


그림 4. 저류량을 이용한 임계지속시간의 선정

(최대방류량기준)

(2) 저류비를 이용한 임계지속시간의 결정

① 최소허용방류공을 이용한 저류비에 대한 임계지속시간의 선정

저류지에 저류되는 양과 유입되는 양의 무차원 값인 저류비의 강우지속기간에 따른 변화량은 그림 5와 같다. 저류비가 최대가 되는 강우지속기간은 40분으로 선정되었다.

2. 최대허용방류공을 이용한 저류비에 대한 임계지속시간의 산정

저류지에 저류되는 양과 유입되는 양의 무차원 값인 저류비의 강우지속시간에 따른 변화량은 그림 6와 같다. 저류비는 강우지속시간이 증가함에 따라 계속 감소함으로 적절한 임계지속시간을 산정할 수 없었다.

저류량을 고려하여 이를 무차원화시켜 상대적인 비교를 할 수 있다는 데는 상당한 장점이 있으나, 저류비를 고려할 때도 저류량의 경우와 마찬가지로 저류지의 규모를 우선 선정하여야 하는 제약점이 있다. 최대허용방류량을 기준으로 하였을 경우 시간에 따른 저류비는 계속 감소하는 것으로 나타나 이 때를 임계지속시간으로 산정하는 것은 합리적이지 못하고, 최소허용방류량을 기준으로 하였을 경우에는 상당히 짧은 시간에서 임계지속시간이 산정되기는 하였지만, 이 또한 저류량 비교와 마찬가지로 저류지의 규모에 따라 달리 산정되므로 적절한 설계강우지속시간으로 선정하는 것은 바람직하지 않다고 판단된다.

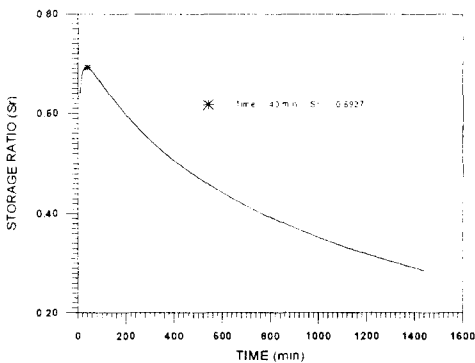


그림 5. 저류비를 이용한 임계지속시간의 산정

(최소방류량기준)

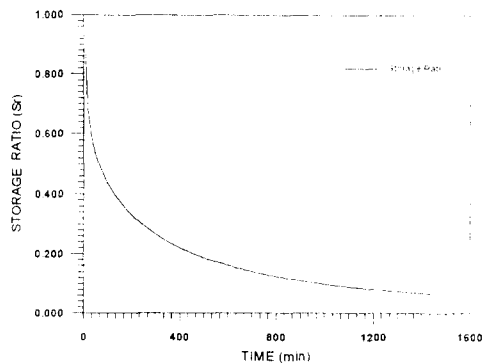


그림 6. 저류비를 이용한 임계지속시간의 산정

(최대방류량기준)

4. 결론

- (1) 임계지속시간이란 하류부에서 최대의 부하가 걸리는 설계강우의 지속시간으로 침투유출량이 최대가 되는 강우지속시간, 개발전·중의 유출량의 차이가 최대가 되는 강우지속시간, 저류지에서의 저류량이 최대가 되는 강우지속시간, 저류비가 최대가 되는 시간 등으로 분류하고, 각 경우에 대하여 비교분석한 결과 자연방류형 저류지를 통한 유출율저감이라는 취지에서 개발중 침투유출량이 최대가 되는 강우지속시간으로 임계지속시간을 산정하였다.
- (2) 침투유출량에 대한 임계지속시간을 이용하여 저류지의 규모를 결정하고, 개발중의 유출량을 대상으로 분석한 결과 개발전의 침투유출량을 초과하지 않았다. 따라서 개발중·후의 재해 위험성을 모두 수용할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

건설교통부 (1993). 하천시설기준.

이재준, 이정식, 전병호, 이종태 (1993). “우수관거 설계를 위한 계획강우의 임계지속시간-서울지역을 중심으로.” 한국수문학회지, 26(2), pp.49~57.

한화국토개발주식회사 (1997). 봉개휴양림관광지조성사업 재해영향평가서.

SCS (1968). “A method for estimating volume and rate of runoff in small watershed.” SCS TP-149, Soil Conservation Service, U. S. D. A.