

도로배수설계를 위한 소유역 설계홍수량 추정

구지희* · 박승우** · ○강문성***

I. 서론

도로 배수시설은 설계홍수량을 안전하게 배제하도록 충분한 규격을 갖추도록 계획하여야 한다. 배수구조물설계지침 (한국도로공사, 1984)에 따르면, 도로의 배수구조물은 설계홍수량의 결정과 수리계산을 통하여 규격을 정하도록 하고 있다. 그런데, 설계홍수량은 배후지의 기상인자와 지형, 토양 및 지질, 토지이용, 식생피복상태 등의 지상인자에 따라 좌우된다. 또한, 도로 축구의 배수량은 노면과 비탈면, 인접지의 조건에 따라 정해진다. 도로의 배수구조물은 그 수가 많아 이들의 설계홍수량을 정확히 산정하는 데는 많은 시간과 비용이 소요되므로, 실제로는 개략적인 추정이 이루어지고 있는 실정이다. 도로 배수 구조물에 대한 홍수량의 추정에 있어서 홍수량을 과다 혹은 과소 추정 결정은 공사비와 치수안정성에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 과학적인 도로 배수 구조물의 홍수량 산정이 이루어져야 할 것이다.

과거의 설계홍수량의 산정은 합리식 등을 이용하여 단순히 첨두유량만을 고려하였다. 최근에는 보다 적절한 설계홍수량의 추정을 위하여 세밀한 수문곡선의 예측이 요구되고 있으며, 과거에 이용되었던 확률강우량만으로는 불충분하여 실제 강우의 분포현상을 충실히 표현할 수 있는 강우의 시간분포를 고려한 홍수량의 추정 기법이 도입되고 있다.

강우의 지속시간은 지금까지 대부분의 설계에 있어서는 합리식을 사용하여 최대평균강우강도가 발생하는 시간으로 설정하였으며, 일반적으로 평균강우강도에 해당하는 홍수도달시간을 강우의 지속시간으로 설정하여 사용하였다 (심재현, 1998). 기존의 설계방식은 불투수성 면적이 매우 많은 지역에 있어 전체 유역면적에 의해 강우의 영향을 받는 시간보다 더 큰 첨두유량이 발생할 가능성이 매우 크므로 (Debo, 1995), 임계지속시간 (critical storm duration)을 고려하는 것이 필요하다.

따라서, 도로배수공 설계를 위해서는 기존의 설계홍수량 산정 모형의 재정립이 필요하고, 강우 분포형태를 고려하여 유출모형의 특성에 따른 임계지속시간 개념을 도입한 홍수량을 추정하고, 토지이용상태와 장래의 토지이용상태의 변화를 설계홍수량추정에 반영하여 적절한 배수단면 설계가 이루어져야 할 것이다.

본 연구의 목적은 도로 배수구조물의 설계홍수량 추정시스템을 개발하기 위하여, 시험유역과 도로 배수공 설계지구를 선정하여 수문자료를 구축하고, 강우의 시간적 분포를 고려한 홍수유량도 추정 모형을 개발하여 그 적용성과 응용성을 평가하는데 있다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 GIS 사업단

** 정회원, 서울대학교 농공학과 교수

*** 정회원, 서울대학교 농공학과 신진연구원

II. 연구방법

1. 도달시간 산정

홍수량 추정을 위한 도달시간은 국내의 실무에서 널리 이용되고 있는 도달시간 산정공식인 Kirpich, Rizha, Kerby, California 도로국, 그리고 KICT(건설기술연구원) 공식 등을 이용하여 산정하였다.

2. 설계강우분포모형

본 연구에서는 건설부 (2001)에서 제시하고 있는 수원 지점의 확률강우량도와 강우강도식을 이용하였다. 강우의 시간적 분포를 분석하기 위한 방법으로서 실무에서 많이 사용되어지고 있는 Mononobe 방법, Huff(1967) 분포형, Yen & Chow(1977)에 의한 삼각형 및 사다리꼴 분포형 등의 대표적인 강우분포 모형을 선정하여 적용하였다.

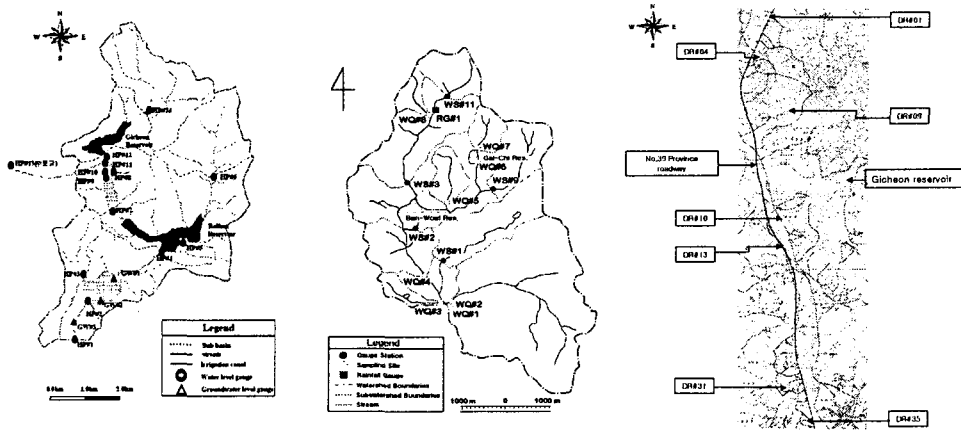
3. 설계홍수량 추정 모형

설계홍수량 추정은 침투유량 산정법과 임계지속시간을 고려한 홍수유량도 모형을 이용하였다. 침투유량 산정법은 합리식, 가지야마 그리고 수정 가지야마 공식을 이용하였으며, 홍수유량도 모형은 Clark 유역추적법, Nakayasu, SCS, 그리고 WFRpaddy 모형 등을 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시험유역

시험유역은 설계홍수량 추정 모형과 도로배수설계의 적용성 평가를 위해 3개의 대상지구를 선정하였다. 설계홍수량 모형의 적용성 평가를 위한 시험유역은 서울대학교 농공학과에서 운영하고 있는 발안저수지 유역의 HP#6 소유역과 반월저수지 유역의 WS#1 소유역을 선정하였다. 도로배수설계의 적용성 평가를 위한 대상지구는 발안, 반월 인근지역으로서 39번 일한국도 발안-반월간 도로확장 및 포장공사구간으로 선정하였다. (그림1)은 발안저수지 및 반월저수지 유역과 39번 국도 대상지구를 나타내고 있다.



(발안저수지 유역)

(반월저수지 유역)

(39번 국도 대상지구)

(그림1) 시험유역 및 대상지구

2. 하천유량자료

설계홍수량은 유효우량에 의한 직접유출량과 기저유출량의 합으로 나타내지만, 대부분의 모형이 유효우량에 의한 직접유출량을 추정하도록 되어 있으므로 먼저 직접유출량을 분리하고 여기에 기저유출량을 추가하도록 하였다. 직접유출량의 분리는 경사급변점법 (傾斜急變點法)을 사용하였다.

3. 홍수도달시간 산정

홍수도달시간의 산정결과는 <표1>과 같으며, 각 산정공식의 결과 값의 평균치와 가장 근접한 결과를 보이는 Kirpich 공식을 각각의 유역의 홍수도달시간으로 채택하였다. Kirpich 공식은 현재 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 공식이다.

<표1> 도달시간 산정 결과

Project	Station Name	Time of Concentration (min)				
		Kirpich	Rizha	Kraven	Kerby	KICT
Balhan	HP#6	33.14	19.57	7.41	61.87	77.72
Banweol	WS#1	49.48	32.40	12.43	78.90	66.89

4. 설계강우분포모형

본 연구에서는 수원기상대의 1964년 6월 11일부터 2000년 5월 30일까지의 시간별 강우자료를 이용하여 각각의 강우분포모형의 매개변수를 결정하였다. 강우분포모형에 따라 한국건설기술연구원에서 이미 제시하고 있는 값이 있는 경우에는 그 결과 값을 이용하였다. 수원지역의 경우, Huff 방법에 의한 분석 결과 2구간 호우와 3구간 호우가 지배적인 것으로 나타났다.

5. 침투 홍수량

침투홍수량은 합리식과 가지야마 및 수정 가지야마 공식에 의해 산정하였으며, <표2>는 재현기간별 설계홍수량의 산정 결과를 나타내고 있다.

<표2> Peak runoff rate from each formula

Frequency (yr)	HP#6	WS#1	Peak Runoff Rate (m ³ /s)					
	Rainfall Intensity (mm/hr)	HP#6			WS#1			
		Rational Method	Kajiyama	Mod. Kajiyama	Rational Method	Kajiyama	Mod. Kajiyama	
2	57.74	49.54	46.65	51.35	59.61	26.90	31.41	34.98
5	70.91	60.26	57.29	58.91	67.24	32.72	36.04	40.13
10	80.71	68.25	65.21	63.92	72.95	37.05	39.10	43.53
25	93.45	78.68	75.51	70.10	80.01	42.72	42.88	47.76
50	102.93	86.46	83.16	74.94	85.53	46.94	45.84	51.05
100	112.28	94.16	90.72	79.59	90.83	51.12	48.68	54.22

6. 홍수량 유량도

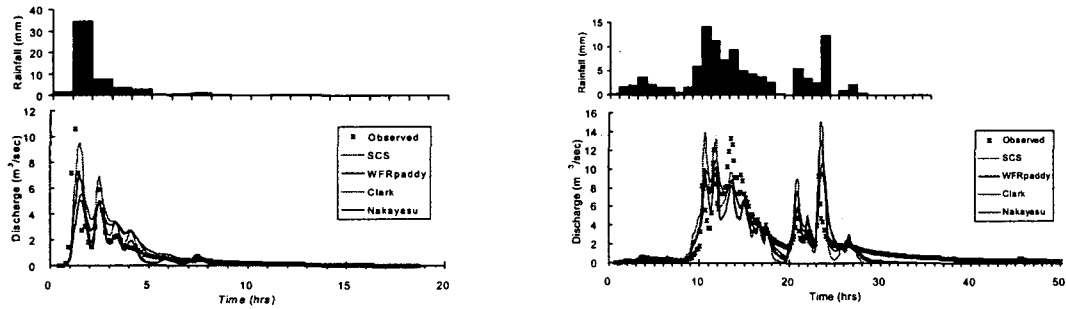
단위도법을 이용한 홍수량 추정은 SCS, WFRpaddy, Clark, Nakayasu 방법 등을 이용하였으며, HP#6 소유역과 WS#1 소유역의 지형특성인자는 GIS를 이용하여 추출한 값을 이용하였다. (그림2)는 시험유역에서의 측정치와 모의치의 유량도를 비교하여 나타내고 있다.

7. 임계지속시간을 고려한 설계홍수량

본 연구에서는 대상지구의 확률강우량을 이용하여 강우분포형에 따른 침투유량을 Clark 모형에

의하여 추정하고, 이를 통하여 침투유량과 임계지속시간과의 관계를 고찰함으로써 적절한 설계홍수량 추정을 위한 임계지속시간을 제시하도록 하였다. <표3>은 강우분포에 따른 임계지속시간과 침투유량을 나타내고 있다.

임계지속시간을 고려한 설계홍수량을 추정하기 위하여, 강우분포모형은 임계지속시간에 대하여 가장 큰 침투유량값을 보였던 Huff 모형을 선정하였고, 재현기간은 25년을 적용하였다. <표4>는 임계지속시간에 대하여 Huff 모형을 적용하여 설계홍수량을 추정한 결과를 나타내고 있다.



(그림2) 홍수량 유량도의 실측치와 추정치의 비교 (HP#6, ST000629, ST000826)

<표3> 강우분포에 따른 임계지속시간과 침투유량

Station	Item	Triangular	Trapezoid	Huff	Uniform
HP#6	Critical storm duration	210	180	300	108
	Peak Runoff	54.92	50.79	65.56	40.65
WS#1	Critical storm duration	252	210	360	138
	Peak Runoff	34.52	32.14	40.80	26.19

* Unit: duration~min, runoff-m³/s

<표4> 강우분포에 따른 임계지속시간과 침투유량 (Huff, 25years)

Station	Item	SCS	WFRpaddy	Clark	Nakayasu
HP#6	T _d (hrs)	5.7	5.5	6.3	5.7
	Q _d (m ³ /s)	79.88	80.70	70.15	61.68
WS#1	T _d (hrs)	5.7	5.5	6.3	5.7
	Q _d (m ³ /s)	56.09	56.23	42.96	41.64

8. 설계홍수량 추정 모형의 비교

실무에서 재현기간으로 적용하고 있는 25년 빈도 임계지속시간에 따른 강우분포형을 고려한 SCS, WFRpaddy, Clark, Nakayasu 등의 단위도법과 합리식, 가지야마, 수정 가지야마 등의 단순홍수량 산정법 등에 의해 산정된 설계홍수량을 비교하였다. <표5>는 적용된 홍수량 추정 모형에 의한 설계홍수량을 모의한 결과를 비교하여 나타내고 있다.

9. 도로배수설계 대상지구 및 침투유량

도로배수 설계홍수량 산정을 위한 대상지구의 축점별 지형인자 및 수문특성과 이에 따른 각각

의 모형에 의한 침투유량 모의결과는 <표6>에서와 같다.

<표5> 설계홍수량 추정 모형에 따른 모의 결과의 비교

Station	Rational Method	Kajiyama	Mod. Kajiyama	SCS	WFRpaddy	Clark	Nakayasu
HP#6	75.51 (100%)	70.10 (92.8%)	80.01 (106.0%)	79.88 (105.8%)	80.70 (106.9%)	70.15 (92.9%)	61.68 (81.7%)
WS#1	42.72 (100%)	42.88 (100.2%)	47.76 (111.8%)	56.09 (131.3%)	56.23 (131.6%)	42.96 (100.6%)	41.64 (97.5%)

<표6> 도로배수설계 대상지구의 측점별 수문특성 및 침투유량 산정 결과

Station Name	Area (km ²)	Flow Length (km)	Slope (m/km)	C	CN	Peak Runoff (m ³ /s)			
						Practical Design	Rational Method	Kajiyama	Mod. Kajiyama
DR#01	0.0381	0.259	3.957	0.79	72	0.9	1.2	1.0	0.5
DR#02	0.2815	0.811	3.326	0.80	74	11.1	6.1	6.5	5.1
DR#03	0.0908	0.545	3.914	0.79	77	3.5	2.3	2.1	1.3
DR#04	1.1426	2.014	2.696	0.77	76	49.7	16.9	21.9	22.4
DR#05	0.0297	0.184	3.373	0.81	74	1.1	1.0	0.8	0.3
DR#06	0.0927	0.353	3.612	0.80	72	4.1	2.7	2.4	1.5
DR#07	0.3829	0.939	2.902	0.80	77	16.6	7.7	8.6	7.3
DR#08	0.1035	0.559	3.347	0.80	77	3.8	2.5	2.5	1.5
DR#09	2.2304	2.738	2.395	0.78	77	95.6	29.6	39.2	42.9
DR#10	1.8627	2.243	1.687	0.76	76	92.8	24.3	34.2	36.8
DR#11	0.0213	0.087	3.355	0.81	80	0.6	0.9	0.8	0.3
DR#12	0.0183	0.112	3.213	0.82	77	0.6	0.8	0.6	0.2
DR#13	0.0077	0.061	2.652	0.80	75	0.5	0.3	0.3	0.1
DR#14	0.0117	0.070	2.310	0.80	75	0.5	0.5	0.4	0.1
DR#15	0.0165	0.087	4.236	0.80	86	0.5	0.8	0.6	0.2
DR#16	0.0222	0.105	2.091	0.83	85	0.9	0.9	0.7	0.3
DR#17	0.0129	0.165	3.210	0.84	82	0.4	0.5	0.3	0.1
DR#18	0.0123	0.116	3.839	0.83	77	0.5	0.5	0.3	0.1
DR#19	0.0238	0.169	2.614	0.77	75	0.9	0.8	0.6	0.3
DR#20	0.0221	0.156	2.781	0.80	75	0.7	0.8	0.6	0.2
DR#21	0.0103	0.144	2.434	0.80	75	0.5	0.4	0.3	0.1
DR#22	0.0101	0.088	4.255	0.80	75	0.5	0.5	0.3	0.1
DR#23	0.0258	0.179	3.727	0.81	75	1.2	0.9	0.7	0.3
DR#24	0.0082	0.110	2.457	0.80	76	0.7	0.3	0.2	0.1
DR#25	0.0130	0.177	3.162	0.80	73	0.6	0.5	0.3	0.1
DR#26	0.0489	0.327	3.210	0.80	75	1.9	1.4	1.2	0.6
DR#27	0.1613	0.705	2.883	0.78	71	5.8	3.4	3.7	2.6
DR#28	0.2882	0.727	2.940	0.75	76	12.3	5.8	6.8	5.4
DR#29	0.1048	0.555	2.622	0.75	74	4.3	2.3	2.5	1.6
DR#30	0.0189	0.181	2.977	0.82	84	0.1	0.7	0.5	0.2
DR#31	0.2958	0.829	2.694	0.78	80	12.7	5.9	6.7	5.5
DR#32	0.0410	0.379	3.264	0.81	80	1.7	1.1	1.0	0.5
DR#33	0.0717	0.406	4.917	0.81	79	2.8	2.1	1.8	1.0
DR#34	0.1505	0.659	2.843	0.77	80	7.0	3.2	3.5	2.4
DR#35	0.0888	0.484	3.087	0.73	81	3.8	2.0	2.2	1.3

10. 설계홍수량 비교

대상지구로 선정된 39번 국도의 35개의 도로배수공 중에서 유역면적을 고려하여 DR#4, DR#7, DR#9, DR#10, 그리고 DR#31 소유역에 대하여 실무에서 설계에 적용하고 있는 재현기간 25년 빈도에 따른 설계홍수량을 추정하여 전체적으로 비교하였다. 임계지속시간에 따른 강우분포형을 고려한 SCS, WFRpaddy, Clark, Nakayasu 등의 단위도법과 합리식, 가지야마, 수정 가지야마 등의 단순홍수량 산정법 등에 의해 산정된 설계홍수량을 실무에서 설계된 자료와 비교 검토하였다.

<표7>은 선정된 도로 배수공에 대하여 실무 설계값과 각각의 모형에 의해서 산정된 설계홍수량을 비교하여 보여주고 있다. 또한, 실무에서 설계된 홍수량을 100으로 하여 본 연구에서 적용된 모형에 의한 홍수량을 비교하였다. 선정된 5개의 소유역 모두 실무에서 계산된 설계홍수량은 7개의 공식 및 모형에서 추정된 홍수량보다 50% 이상 크게 계산된 것으로 나타났다. 모형별 설계홍수량의 크기는 평균적으로 볼 때 가지야마, 수정가지야마, SCS, WFRpaddy, Clark, Nakayasu, 합리식 순인 것으로 나타났다.

<표7> 수문모형별 설계홍수량의 산정 결과 (Unit: m³/s (%))

Station	Practical Design	Rational Method	Kajiyama	Mod. Kajiyama	SCS	WFR-paddy	Clark	Nakayasu
DR#04	49.7(100)	16.9(34.1)	21.9(44.2)	22.35(45.0)	20.7(41.7)	20.7(41.6)	17.8(35.8)	18.9(38.0)
DR#07	16.6(100)	7.7(46.2)	8.6(51.6)	7.29(43.9)	8.3(50.0)	8.3(50.0)	9.3(56.0)	7.2(43.6)
DR#09	95.6(100)	29.6(31.0)	39.2(41.0)	42.91(44.9)	34.1(35.7)	34.1(35.6)	27.1(28.4)	32.2(33.7)
DR#10	92.8(100)	24.3(26.2)	34.2(36.8)	36.80(39.6)	29.5(31.7)	29.5(31.8)	23.8(25.6)	27.8(29.9)
DR#31	12.7(100)	5.9(46.9)	6.8(53.4)	5.45(43.0)	6.8(54.0)	6.4(50.7)	7.9(62.1)	5.9(46.9)
Mean(%)	100	36.9	45.4	43.3	42.6	41.9	41.6	38.4

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 도로 배수구조물의 설계홍수량을 추정하기 위하여, 시험유역과 도로배수공 설계지구를 선정하여 수문자료를 구축하고, GIS 기법을 이용하여 유역의 특성인자를 추출하고, 기존의 설계홍수량 모형을 재정립하여 적용성을 검토하고, 강우분포모형을 고려한 임계지속시간에 따른 설계홍수량을 추정하여 적용성과 응용성을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 재현기간 25년에 대하여 강우분포형이 Huff일 때 첨두유량이 가장 크게 나타났고, 실무의 설계홍수량추정값을 고려할 때, Huff의 시간분포모형을 적용하는 것이 타당할 것으로 보인다.
2. HP#6과 WS#1소유역의 CN 변화에 따른 임계지속시간과 이에 따른 첨두유량의 변화는 CN값이 증가함에 따라 첨두유량이 증가하였고, 임계지속시간은 감소하는 경향을 보였다.
3. 홍수량도산정법을 적용한 결과 첨두유량의 결정계수와 RMSE가 각각 HP#6 유역이 0.938~0.972와 2.1~2.8 m³/sec로, WS#1 유역은 0.977~0.997, 0.4~1.5 m³/sec로 나타났으며, 자료량이 많은 HP#6 유역을 기준으로 했을 경우 Clark 모형이 실측치를 가장 잘 반영하는 것으로 나타났다.
4. 39번 국도의 발안-반월간 대상지구의 배수공별 유역면적은 0.0077~2.2304 km², 유로장은 0.061~2.738 km, 유역경사는 1.687~4.917 m/km, 유출계수는 0.73~0.84, 유출곡선번호는 71~86의 범위를 나타냈다.
5. 도로 배수공 측정인 DR#4, DR#7, DR#9, DR#10, DR#31에 대한 모형의 모의결과는 첨두유량의 경우에 SCS 모형이 가장 큰 값을 보였고, Clark 모형은 가장 작은 값을 보였다.