공간 분포된 강우를 사용한 유출 매개변수 추정 및 강우오차가 유출계산에 미치는 영향분석

윤용남[1] / 김중훈[2] / 유철상[3] / 김상단[4]

1. 서론

전통적인 단위도를 이용한 유출해석방법은 유역의 공간 평균된 강우를 입력자료로 사용해왔으며 이는 일반적으로 특정한 위치의 강우 관측소로부터 관측된 강우자료를 이용할 수밖에 없는 현실적인 문제 때문이었다. 그러나, 최근 레이더 관측을 이용한 강우 관측이 활발하게 시행 또는 계획되고 있으며, 따라서 이에 대한 새로운 유출해석의 필요성이 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 공간 분포된 강우의 적용을 용이하게 하기 위하여 상대적으로 단순한 준 분포형 접근방법인 수정Clark방법(Daniel과 Arlen, 1998)을 적용하여 유출해석을 수행하였다. 분석을 위한 공간적으로 분포된 강우자료를 획득하기 위해서 단순 크리깅 기법을 통하여 공간 분포된 강우자료를 작성하였으며 공간 분포된 강우를 수정Clark방법에 의해서 유출계산을 수행한 후, 지점 강우자료를 티센 평균한 강우를 Clark방법에 의해서 유출 계산한 결과와 비교하였다.

2. 수정Clark방법

수정Clark방법의 개념은 Clark(1945)의 개념적인 강우유출모형에서 사용하고 있는 기본원리를 기초로 하여 공간적으로 분포된 강우자료의 모의기능을 추가한 것이라고 할 수 있다. 이 방법의 두 가지 대표적인 매개변수는 도달시간 T_c와 저류상수 K이다. 모형에 대한 보다 자세한 설명 및 구축방법은 Daniel과 Arlen(1998)에서 참조 가능하다.

3. 대상유역의 선정 및 자료조사

대상유역으로는 남한강상류 IHP대표유역인 평창강유역을 선정하였다. 평창강유역도를 그림 1에 나타내었다. 적용유역의 하천지형인자는 1:50,000 지형도에서 구하였으며 그 결과 수치고도모형, 팔방흐름모형 및 각 격자별 면적을 그림 2~4에 각각 나타내었다. 참고로 그림 3의 팔방흐름모형의 결과는 그림 1과 비교하여 볼 때, 유역의 하천망을 비교적 유사하게 모의하고 있음을 알 수 있다.

4. 수정Clark방법의 매개변수 추정

과거 지점 강우를 공간적으로 분포시키기 위하여 본 연구에서는 크리깅(kriging) 기법을 적용하였다.

1) 고려대학교 토목환경공학과 교수
2) 고려대학교 토목환경공학과 부교수
3) 고려대학교 환경공학과 부교수
4) 고려대학교 부설 방재과학기술연구소 연구원

리깅 기법은 기지의 값을 통하여 미지의 값을 추정하는 지형통계학적인 방법으로서 해당유역의 경우 11개 지점의 강우량 자료를 바탕으로 나머지 격자의 강우량을 추정할 수 있다. 이 때, 강우자료의 공간적 변동성에 대한 변동수(semivariance)의 경우 거리에 선형 비례하는 것으로 단순 가정하였다. 그림 5에 사용된 강우사상에 대한 방림, 위천, 계방지점에서의 우량주상도를 일부 나타내었으며, 그림 6은 11개 강우관측소를 사용하여 사상 860718을 크리깅 기법에 의해 공간 분포시킨 결과의 일부를 보여주고 있다.

유역의 매개변수인 도달시간 t_c 및 저류상수 K를 구하기 위하여 1983~1989년 주요호우를 대상으로 도달시간 t_c, 저류상수 K 및 CN값을 결정변수로 하여 Davidon-Fletcher-Powell법(Mays와 Tung, 1992)을 이용한 매개변수 최적화과정을 실시하였으며, 이 때 목적함수 Z는 Hydrologic Engineering Center (1995, 1998)에서 사용되고 있는 HEC-1 목적함수를 이용하였다. 추정된 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 CON은 전통적인 Clark방법에 의한 매개변수 추정치를, MOD는 수정Clark방법에 의한 매개변수 추정치를 의미한다. 즉, 전통적인 Clark방법을 사용하여 매개변수를 추정할 때, 3개소의 경우는 유역 내 방림, 위천, 계방 3개 관측소의 티센 평균한 강우자료를, 11개소의 경우는 11개 관측소를 모두 사용하여 각각 추정하였으며, 수정Clark방법을 사용하여 매개변수를 추정할 때는 위에 언급한 3개 관측소 및 11개 관측소를 사용하여 크리깅 기법으로 공간 분포시킨 강우자료를 사용하였다. 3개 관측소를 사용한 별도의 티센망을 구축한 이유는 세계기상기구(WMO)에서 추천하고 있는 수문기상학적 일반목적을 위한 강우관측망의 최소밀도가 해당유역의 경우 100~250㎢/개소임(윤용남, 1994)을 감안하여 별도로 선정하였으며, 1개 관측소를 사용한 이유는 보다 열악한 상황에 대한 분석을 해 보고자 함이다. 또한, 상기 3개 관측망의 밀도는 우리나라 평균 강우관측망의 밀도와도 비슷한 값을 주고 있다.

표 1. Clark 및 수정Clark방법의 매개변수 추정

강우사상			830702	840702	850513	860718	870721	880712	890724	평균	변동계수
강우량 (㎜)	CON	1개소	100.50	344.70	131.00	302.50	302.50	202.00	377.50		
		3개소	99.71	249.49	118.48	286.04	286.04	174.55	283.62		
		11개소	97.16	232.28	105.20	260.58	260.58	169.63	256.77		
	MOD	3개소	101.40	232.29	118.33	283.24	283.24	174.34	285.14		
		11개소	100.57	229.61	108.33	269.69	269.69	172.04	263.35		
도달시간 (hr)	CON	1개소	4.18	3.00	3.19	6.05	6.05	4.50	3.93	4.76	40.51
		3개소	4.00	4.15	3.60	8.50	8.50	4.88	5.88	5.64	36.93
		11개소	4.00	4.50	4.11	5.45	8.50	3.00	8.50	5.87	42.55
	MOD	3개소	7.19	5.75	3.26	4.51	5.45	4.75	8.25	5.75	28.08
		11개소	9.74	7.00	4.12	6.40	4.51	4.62	7.00	6.18	32.02
저류상수 (hr)	CON	1개소	20.00	18.20	8.16	2.62	6.40	8.11	20.00	11.93	60.81
		3개소	20.00	10.87	7.51	2.12	4.26	9.21	13.64	9.66	61.99
		11개소	20.00	10.78	8.13	2.20	4.48	2.00	8.53	8.02	77.92
	MOD	3개소	20.00	12.31	6.65	6.76	7.63	11.19	11.88	10.92	42.92
		11개소	20.00	9.44	8.39	4.75	7.75	8.07	7.79	9.45	51.47
CN값	CON	1개소	77.16	60.00	60.00	80.53	82.56	72.27	71.51	72.00	12.67
		3개소	78.08	69.89	62.65	81.67	77.90	77.96	87.12	76.47	10.43
		11개소	79.17	74.85	67.34	79.49	81.57	63.88	91.79	76.87	12.11
	MOD	3개소	78.43	70.50	60.02	84.50	81.03	79.69	85.15	77.05	11.59
		11개소	81.82	72.39	68.34	82.69	83.39	75.83	88.49	78.99	8.93
목적함수 Z	CON	1개소	24.20	153.87	43.12	89.20	110.29	96.77	214.73	104.60	61.88
		3개소	24.24	39.93	35.26	73.82	110.91	93.29	128.98	72.35	56.08
		11개소	22.91	32.98	25.13	72.69	108.00	42.44	125.71	61.41	67.80
	MOD	3개소	18.56	37.13	35.68	98.51	120.42	82.24	125.83	74.05	58.89
		11개소	12.00	48.99	21.16	74.95	99.46	62.16	97.28	59.43	57.91

표 1에 나타난 바와 같이 분석결과 강우관측소를 1개소만 사용하였을 경우에는 면적평균 강우량에 있어서 최대 50%까지 오차가 발생할 수 있는 것으로 계산되었다. 이는 강우관측소 1개가 500㎢이상의 면적을 대표할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 3개 강우관측소를 사용하여 추정한 면적평균 강우량은 11개 강우관측소에서 계산된 면적평균 강우량과 ±10% 정도의 오차를 보일 수 있는 것으로 계산되었다. 또한, 크리깅 기법으로 구한 공간 분포된 강우의 면적평균 강우량과 지점 강우자료의 티센평균강우량은 3개 강우관측소를 사용한 경우 ±7%, 11개 강우관측소를 사용한 경우 ±4% 정도의 차이를 보이고 있다. 그러나, 이 때의 공간 분포된 강우는 실제 강우장의 공간분포를 표현한 것이 아니라, 단지 사용된 지점 강우량을 바탕으로 하

여 상대거리를 기준으로 작성된 강우장이므로 계산된 오차가 실제 강우관측망이 갖고 있는 오차라고 보기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 이 때, 주목할 점은 추정된 매개변수가 매 사상별로 얼마나 차이를 갖고 있느냐하는 문제이다. 즉, 목적함수를 매우 작게 하면서 매개변수를 추정하였다할지라도 사상마다 크게 다른 추정값을 준다면 추정에 사용된 사상 이외의 강우사상에 대한 홍수량 산정 시 어떠한 매개변수를 적용해야 하는지에 대해 난감한 문제에 직면할 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 표 1에서 관심이 되는 부분은 최적 추정된 도달시간 t_c 및 저류상수 K, CN값의 변동계수이다. 평균적으로 볼 때, 1개 강우관측소를 사용한 경우를 제외한 나머지 경우는 모두 비슷한 목적함수를 가지며 추정되었다. 도달시간 t_c 및 저류상수 K, CN값들 또한 나머지 4개 경우 모두 유사한 값으로 계산되었다. 그러나, 도달시간 t_c 및 저류상수 K, CN값의 변동계수는 수정Clark방법이 전통적인 Clark방법보다 더 작은 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 강우의 공간적 변동성으로부터 설명될 수 있다. 즉, 수정Clark방법의 경우는 강우의 공간적인 변동성을 고려한 유출 계산이 가능하기 때문에 이에 대한 불확실성이 일부 제거된 상태에서 매개변수 추정이 가능하게 되기 때문이다. 전통적인 Clark방법의 경우는 매개변수 자체의 불확실성뿐만 아니라 강우가 갖고 있는 공간적인 불확실성 또한 매개변수 추정 시 덧붙여지기 때문에 그 만큼의 변동계수가 증가되는 것으로 보여진다.

5. 강우관측소 개수에 대한 강우오차가 유출오차에 미치는 영향 분석

본 연구에서는 지상관측의 경우에 생기는 강우오차 ε_i를 다음과 같이 정의하였다.

$$\varepsilon_i = \int_0^{T_d} \frac{t}{\sigma(t)} \int_0^X \int_0^Y xy \cdot |\psi(x,y,t) - \psi_T(t)| dydxdt \times 100\ (\%) \tag{1}$$

여기서 $\psi(x,y,t)$는 시간 t 및 위치 (x,y)에서의 강우강도로 정의되며, $\psi_T(t)$는 시간 t에서 해당 지역의 특정 티센가중 평균강우강도를 의미한다. 또한 $\sigma(t)$는 시간 t에서 해당지역 강우의 공간적인 표준편차를 의미하며, T_d 및 X, Y는 각각 강우지속시간 및 해당 지역의 영역을 의미한다. 이에 대응하는 유출오차 ε_f는 다음과 같이 정의하였다.

$$\varepsilon_f = \int_0^{T_f} t \cdot \frac{|Q(t) - Q_T(t)|}{Q(t)} dt \times 100\ (\%) \tag{2}$$

여기서 $Q(t)$는 공간적으로 분포된 강우로 인한 시간 t에서의 유출량이며, $Q_T(t)$는 티센가중 평균강우로 인한 시간 t에서의 유출량을 의미한다. 또한, T_f는 유출계산시간을 의미한다.

표 2. 적용된 티센망

관측소 개수	관측소 밀도 (㎢/1개소)	사용된 강우관측소 및 티센가중치 관측소명 (티센가중치)
1	519.78	위천(1.000)
2	259.89	수통(0.473), 계방(0.527)
3	173.26	방림(0.246), 위천(0.418), 계방(0.336)
5	103.96	방림(0.073), 가평(0.200), 등매(0.309), 계방(0.200), 홍정(0.218)
7	74.25	가평(0.136), 계촌(0.055), 신리(0.145), 위천(0.182), 용전(0.145), 계방(0.136) 홍정(0.201)
9	57.75	가평(0.068), 수통(0.049), 대화(0.089), 신리(0.087), 위천(0.107), 등매(0.113) 용전(0.131), 계방(0.147), 홍정(0.209)
11	47.25	방림(0.023), 가평(0.068), 수통(0.026), 계촌(0.007), 대화(0.089), 신리(0.087) 위천(0.100), 등매(0.113), 용전(0.131), 계방(0.147), 홍정(0.209)

강우관측소의 밀도별 강우오차 및 유출오차를 계산하기 위하여 표 2와 같이 강우관측소의 밀도별 총 7개의 티센망을 구축하여 각각에 대한 강우오차 및 유출오차를 추정하는데 이용하였다. 강우관측소 개수에 대한 강우-유출오차의 관계를 각각 그림 7과 8에 도시하였으며, 강우오차와 유출오차 사이의 상관관계를 회귀분석하여 그림 9에 나타내었다. 또한, 그림 9의 분석결과를 바탕으로 하여 강우관측소 밀도에 대한 강우-유출오차비의 관계를 그림 10에 도시하였다.

강우관측소의 밀도가 조밀해짐에 따라 강우오차(그림 7)와 유출오차(그림 8)는 모두 지수함수적으로 감소하고 있다. 또한, 오차가 발생할 수 있는 범위(그림 7과 8에서 점선)는 강우관측소의 밀도가 작은 경우에 오차의 범위가 매우 크며, 관측소의 밀도가 커짐에 따라 오차는 평균적인 값에서 크게 벗어나지 않고 있다. 이러한 현상은 두 가지 측면에서 중요한 정보를 포함하고 있다. 첫 번째는 강우관측소의 밀도가 상대적으로 낮은 유역의 경우 실제 유출량이 예보된 유출량을 훨씬 상회하여 발생할 확률이 더 크다는 것을 의미하며, 두 번째 사항은 관심 유역에 강우관측소의 추가 설치 시 가장 경제적인 강우관측소의 밀도를 추정할 수 있다는 것을 의미한다. 그림 9는 강우관측소의 밀도에 따른 강우오차와 유출오차 사이의 관계를 보여주는 그림으로 밀도가 증가함에 따라 강우오차가 유출오차에 미치는 영향이 상대적으로 작아지고 있음을 알 수 있으며, 밀도가 어느 한계 이상이 되면 강우오차에 대한 유출오차의 영향비가 상대적으로 수렴하는 것으로 파악되었다. 이는 다시 그림 10에서 확인할 수 있듯이 강우-유출 오차의 비는 강우관측소 밀도와 지수함수적인 관계를 맺고 있음을 파악할 수 있다.

6. 결론

본 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 공간 분포된 강우자료가 이용될 경우 기존에 추정된 Clark방법 유출 매개변수의 사용이 가능할 것으로 판단된다.
2. 수정Clark방법의 경우는 강우의 공간적인 변동성을 고려한 유출 계산이 가능하기 때문에 이에 대한 불확실성이 일부 제거된 상태에서 매개변수 추정이 가능하게 되며, 따라서 전통적인 Clark방법의 경우보다 안정적인 매개변수를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 강우오차 및 유출오차는 강우관측소의 밀도가 높아짐에 따라 지수함수적으로 감소하고 있으며, 오차의 범위 또한 밀도가 증가할수록 평균 오차 주위로 수렴하는 것으로 보여진다.
4. 강우오차는 강우관측소의 밀도가 작을수록 유출에 보다 큰 영향력을 미치고 있음을 알 수 있었다.

7. 참고문헌

건설교통부 (1998), 국제수문개발계획(IHP).

Clark, C. O. (1945), Storage and the Unit Hydrograph. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 110, pp. 1419-1446.

Daniel W. Kull and Arlen D. Feldman (1998), Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. *J. of Hydrologic Eng.*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-19.

Hydrologic Engineering Center (1998), HEC-HMS : Hydrologic Modeling System, User's Manual. *U.S. Army Corps of Engineers*, Davis CA.

Hydrologic Engineering Center (1995), Modified Clark (ModClark) Runoff Simulation User's Manual. *U.S. Army Corps of Engineers*, Davis CA.

Mays, L. W. and Tung, Y.-K. (1992), Hydrosystems Engineering and Management, *McGraw-Hill, Inc.*, International Editions, pp. 106-163.

8. 표 및 그림

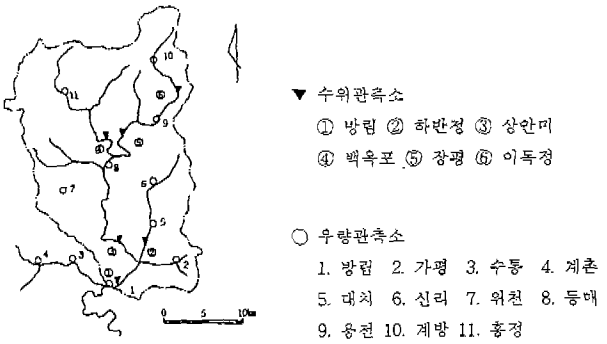


그림 1. 평창강유역도 (건설교통부, 1998)

						1240		
					970	830	990	
		810	870	890	900	1000	800	710	990
	710	690	770	740	690	690	690	670	720
	730	630	600	630	610	630	670	630	630
910	740	670	570	550	570	590	600	600	650
	820	630	570	530	550	550	570	590	
	790	650	590	530	490	500	670	660	710
	800	610	550	530	470	490	580	550	680
	900	660	630	550	470	550	470	510	650
	870	670	630	500	450	590	440	450	800
		1080	670	450	410	610	410	470	1030
			800	410	390	370	390	540	570
				770	480	360	370	430	440
					450	350	600	560	540

그림 2. 수치고도모형(단위:EL.,m)

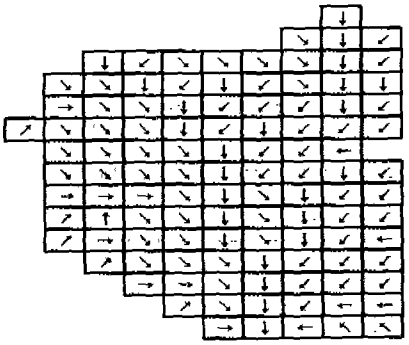
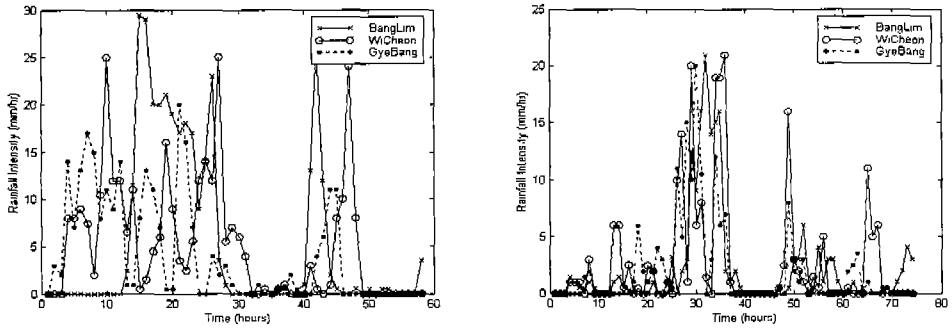


그림 3. 팔방흐름모형

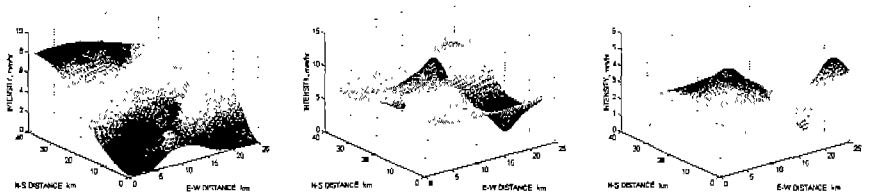
							0.48	
						3.77	5.83	0.33
		2.22	2.38	2.42	1.29	1.33	5.41	5.23	0.07
	2.89	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	2.76
	5.41	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	3.09
1.12	5.56	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	5.85	1.64
	3.65	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	4.37	
	2.98	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	5.62	0.69
	0.79	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	2.16
	0.35	5.66	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	3.49
	0.12	4.98	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	2.20
		0.06	2.60	6.25	6.25	6.25	6.25	5.60	0.33
			0.05	5.06	6.25	6.25	6.25	5.79	2.74
				0.41	2.67	6.25	6.25	6.25	3.70
					0.21	3.44	3.21	3.36	3.17

그림 4. 격자 면적(총 유역면적 519.78㎢)



(a) 870721 (b) 880712

그림 5. 주요호우의 지점별 우량주상도



(a) 5~6시간 (c) 15~16시간 (d) 20~21시간

그림 6. 사상 850513을 크리깅 기법에 의해 공간 분포시킨 결과 (11개 강우관측소 사용)

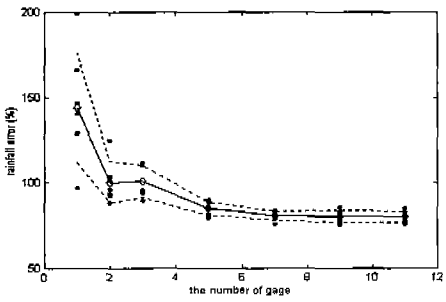


그림 7. 강우관측소 개수에 대한 강우오차

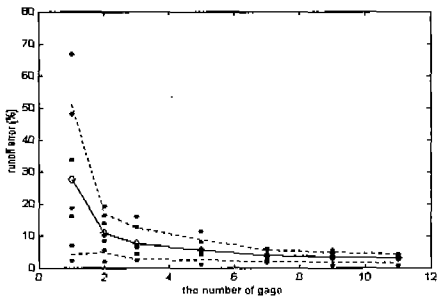


그림 8. 강우관측소 개수에 대한 유출오차

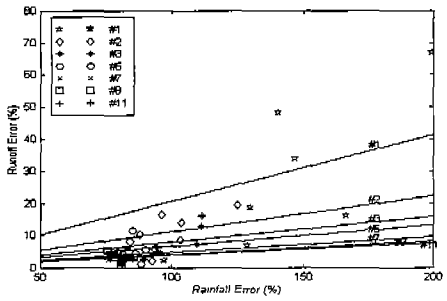


그림 9. 강우오차와 유출오차의 상관관계

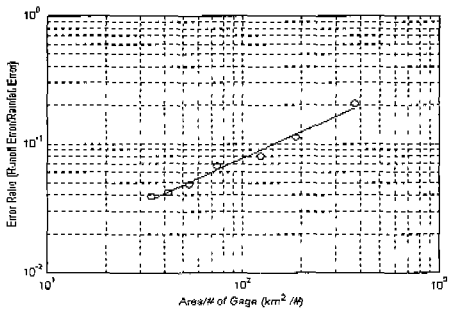


그림 10. 강우관측소 밀도에 대한 강우-유출오차 영향비