

이동강우의 공간적 분포형이 지표면유출에 미치는 영향

Effect of Rainfall Distribution Types of Moving Rainstorms on Surface Runoff

전 민 우* / 이 효 상** / 전 종 기***

Jeon, Min Woo / Lee, Hyo Sang / Jeon, Jong Ki

Abstract

Based on the kinematic wave equations, the influence of moving rainstorms on the surface runoff were analyzed with a focus on the rainfall distribution types. Applied hypothetical rainfall distribution types of moving rainstorms used are uniform, advanced, delayed and intermediate type. The moving rainstorm velocities applied in this study were 0.125~2.0 m/s of moving upstream and downstream direction of plane surface. Simulations were undertaken by varying the rainfall distribution type, moving rainstorm velocity and moving direction, and the results were compared with that of stationary rainfall. The results indicate significant differences in peak discharges and hydrograph shapes for moving rainstorms of various rainfall patterns and moving directions. It shows that the moving rainstorms of downstream direction generate the largest peak runoff at all rainfall distributions. The sensitivity of runoff to rainfall distribution types decreases as storm velocity increases. It is clear that faster rainstorm velocity generates faster peak time and becomes thin hydrographs rapidly.

key words : moving rainstorm, moving velocity, rainfall distribution type, kinematic wave equation

요 지

강우분포형에 따라 이동강우가 지표면유출에 미치는 영향을 분석하였으며, 지배방정식으로 운동파방정식을 적용하였다. 이동강우의 강우분포형은 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형을 사용하였으며, 이동강우에 상응하는 정지강우의 경우와 유출을 비교하였다. 본 연구에 적용한 강우의 이동속도는 0.125-2.0m/s이며, 이동방향은 지표면의 상류와 하류방향을 고려하였다. 이동강우의 강우분포형과 이동강우의 특성은 지표면 유출수문곡선의 모양과 첨두유량에 현저하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 모든 강우분포형에서 하류방향의 이동강우에 의하여 가장 큰 첨두유량이 발생함을 알수 있으며, 강우분포형에 의한 유출량 민감도는 강우이동속도가 증가함에 따라 감소하고 있다. 강우이동속도가 빠르면 첨두시간이 짧아지고 수문곡선의 모양이 급격히 얇아진다.

핵심용어 : 이동강우, 이동속도, 강우분포형, 운동파방정식

* 정희원 · 충북대학교 토목공학과 교수 (E-mail ; minwoo@chungbuk.ac.kr)

** 충북대학교 토목공학과 전임강사

*** 충북대학교 토목공학과 박사과정

1. 서 론

유출수문곡선은 강우량, 강우강도, 강우지속시간, 강우이동방향 및 이동속도와 같은 강우특성과 공간적 변화에 의하여 영향을 받으며, 특히 강우의 시간적, 공간적분포는 유출에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 이와 같은 강우의 시간적, 공간적 분포는 이동강우의 진행방향, 이동속도, 강우길이 그리고 강우분포형에 의하여 나타내어 질수 있으며, 강우의 진행방향은 단순화를 위하여 지표면에서 흐름방향을 기준으로 하류방향과 상류방향으로 구별할 수 있다.

이동강우에 대한 연구는 Maksimov(1964)에 의하여 처음 이루어 졌으며, Marcus(1968)가 이동강우에 대한 실험적 연구를 한 이후 이동강우가 유출에 미치는 영향은 많은 연구가 이루어져 왔다. Richardson(1989)이 1차원 유한요소법으로 이동강우를 분석하였고, Ogden 등(1995)이 강우이동속도와 강우길이를 무차원화하므로써 2차원 강우-유출모형을 사용하여 유출을 모의한 연구에 이어 Singh(1997, 1998, 2002a, 2002b)과 Lima(1999, 2003)에 의한 많은 연구가 이루어 졌다. 국내에서는 최계운 등(1992)이 이동강우해석을 위한 분포형모형을 개발한 연구가 있고, 최계운 등(2000)은 실제유역에서 GIS를 이용한 이동강우의 영향을 분석하였으며, 최근 한건연 등(2004, 2006)의 연구가 있다.

강우-유출해석에 있어서 넓은 유역에서도 공간적으로 동일한 강우가 발생하는 것으로 가정하여 해석하는 경우가 많으나, 실제 자연현상에서 비구름은 임의의 속도로 이동하면서 강우를 발생시키고 있으며, 유역전체에 균등분포 강우가 강하한다고 가정하기 어려운 경우가 많다. 이동강우는 시·공간적으로 변화하는 계량하기 어려운 자연현상으로서 이에 따른 강우-유출해석은 매우 어렵고 해석방법에 한계가 있으며, 일반적으로 강우-유출해석시 편의상 정지강우(stationary rainfall)로 해석하고 있다. 최근 국지성 집중호우로 인한 홍수피해가 급증하고 있는 기상상황을 감안한다면 이동강우의 특성을 파악함과 동시에 이동강우와 정지강우에 대한 비교분석이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 이동강우의 양상(pattern)이 지표면 유출에 미치는 영향을 분석하며, 이동강우의 특성을 정지강우의 경우와 비교분석하였다. 이를 위하여 이동강우의 분포형을 설정하여 다양한 진행속도를 가진 강우가 지표면에서 상류방향, 하류방향으로 이동할 때 유출수문곡선을 모의하여 그 특성을 정지강우의 경우와 비교분석하였고, 이때 지배방정식으로서 운동과이

론을 적용하였다.

2. 지배방정식

임의의 속도로 이동하여 강하하는 강우는 지표면으로의 측방유입이 되며 부정류 개수로흐름문제로 간주될 수 있다. 지표면흐름은 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된 Saint-Venant방정식에 의하여 이상적으로 표현될 수 있다. 보존식형태의 Saint-Venant 방정식에서 관성력과 압력항을 무시할 경우 운동과(Kinematic wave)가 흐름을 지배하게 되며, 1차원흐름의 경우 지표면흐름에 대한 연속방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = \ell(x,t) \quad (1)$$

여기서 t =시간(sec), x =지표면 흐름방향으로의 거리(m), q =단위폭당 유량(m^2/s), h =지표면 수심(m), ℓ =측방유입량으로서 지표면흐름의 경우 공간적, 시간적으로 변화하는 유효강우(m/s)이다.

해석의 단순화를 위하여 지표면은 불투수층이며 지표면 경사는 완만하고 흐름은 1차원흐름이라 가정한다. 가정에 의하여 지표면흐름을 수심의 함수로 나타내어 식 (2)와 같은 운동량방정식으로 표시할 수 있다.

$$q = \alpha h^\beta \quad (2)$$

여기서 α 와 β 는 경험상수이며, Manning의 등류공식을 적용하면 α 와 β 는 각각 $\alpha = \frac{\sqrt{S_f}}{N}$, $\beta = 5/3$ 이며, N =조도계수, S_f = 마찰경사이다.

식 (1)의 연속방정식과 식 (2)의 운동량방정식이 지표면흐름의 지배방정식이 되며 두 식을 연립으로 풀어서 q 와 h 를 구하는 것이다. 식 (2)를 시간 t 에 대하여 편미분하여 식 (1)에 대입하면 운동과방정식 (3)은 얻을 수 있으며, 이때 V_p 는 지표면흐름의 평균유속이다.

$$\frac{\partial q}{\partial x}(\beta V_p) + \frac{\partial q}{\partial t} = \ell \beta V_p \quad (3)$$

유한차분법을 이용하여 운동과방정식을 수치해석하는 방법에는 여러가지가 알려져 있으나, 2차精度보다 안정성이 있는 1차精度 수치해법을 사용하여 식 (3)

을 이산화시키면 식 (4)와 같다.

$$q_{i+1}^{n+1} = (1-C)q_{i+1}^n + Cq_i^n + C\Delta x \ell \quad (4)$$

여기서 지표면 흐름의 Courant수 C 는 식 (5)와 같으며, 이때 지표면흐름에 대하여 forward-in-time, backward-in-space 차분법을 사용하였으며, 안정해를 얻기 위하여 $C \leq 1$ 의 조건을 만족해야 한다. 여기서 i =공간격자점, n =시간격자점을 나타낸다.

$$C = \frac{\beta V_p \Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

이동강우의 경우-유출을 모의하기 위하여 Δx 로 이산화한 지표면을 Δt 시간씩 강우를 이동시키므로서 유출추적을 하며, 강우의 이동속도는 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 로서 나타내어진다.

3. 적용 및 분석

3.1 모형지표면과 강우분포형

본 연구에서는 이동강우가 지표면 유출의 수문곡선 모양과 첨두유량 그리고 첨두시간에 미치는 영향을 분석하여 정지강우의 경우와 비교분석하였으며, 이동강우는 시간적으로 변하지 않는 분포형을 갖는 강우가 모형지표면을 일정한 속도로 이동하는 경우를 설정하였다. 이와 같은 이동강우의 영향은 유역의 물리적 특성에 따라 변화하겠으나 본 연구에서는 강우강도의 공간적 분포형태와 강우의 진행방향과 이동속도에 주안점을 두었다. 지표면의 물리적 특성을 단순화하여 200m(길이)×200m(폭)의 정사각형으로 가정하여 그림 1에 나타내었다. Kirby(1978)에 의하면 지표면에서 3~15cm/s범위의 지표면유속이 측정되고 있다 하여 본 논문에서는 위의 범위내에 있는 지표면 평균 유속 0.1m/s를 사용하였다.

강우의 시간적 분포양상은 유출수문곡선의 모양을 결정하는 중요한 요소이다. 정지강우의 시간적 변화는 강우주상도에 의하여 표현되며, 이동강우는 시간적으로 일정한 분포형을 가진 강우가 지표면을 이동하는 경우에 대하여 지표면의 거동을 분석하였으며 간편성을 위하여 손실강우는 고려하지 않았다.

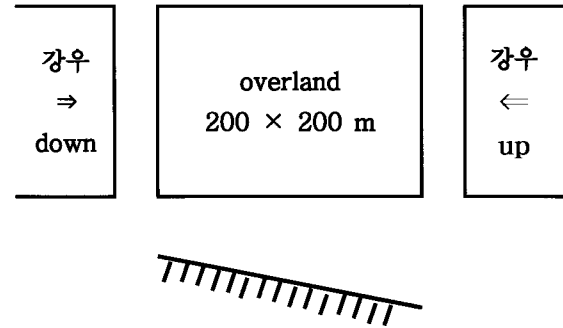


그림 1. 지표면에서의 이동강우

이동강우에 대한 수문학적 응답을 구하기 위하여, 일정한 길이를 가진 강우가 공간상에서 이동하는 측방향유입을 고려하며, 이것은 강우의 이동속도에 의하여 지표면유출에 기여하는 강우의 시간적 분포를 내포한다. 동일한 총강우량이라 할지라도 강우의 공간적 분포형과 이동방향, 그리고 이동속도에 따라 수문곡선이 달라지며, 강우의 공간적 분포형을 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형으로 설정하여 그림 2에 나타내었다. 모든 경우 이동강우의 길이는 1000m(길이)×200m(폭)이며 총강우량은 170mm/hr이다. 총유출량은 강우이동속도 $V_r=0.125$ m/s때 3022.0m³, $V_r=0.25$ m/s때 1511.0m³, $V_r=0.5$ m/s때 755.5m³, $V_r=1.0$ m/s때 377.8m³, $V_r=2$ m/s때 188.9m³, $V_r=4$ m/s때 94.4m³이다. 강우이동방향은 지표면의 상류방향과 하류방향에 대하여 분석하였다.

이동강우에 의한 유출을 모의하기 위하여 Δx 로 이산화한 지표면을 Δt 시간씩 강우를 이동시키므로서 유출추적을 하였다. 강우의 이동속도는 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 에서 Δt 를

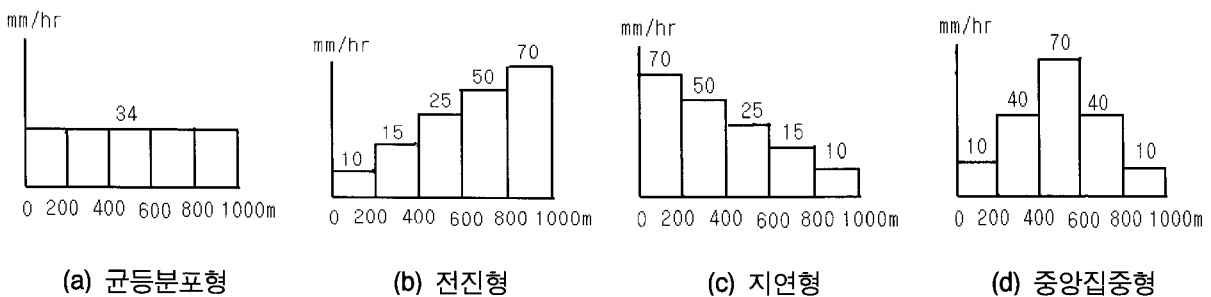


그림 2. 이동강우의 강우분포형

변화시키므로서 나타내었다. 강우이동속도는 매우 광범위하게 분포하며 Ngrane-Katashaya와 Wheater (1985)는 0.156~20m/s범위의 강우이동속도를 사용하여 유출영향분석을 한바 있으며, 본 연구에서는 수문곡선작성의 간편성을 위하여 속도범위는 0.125~2.0m/s를 사용하였다. 하류방향의 경우, 최상류지표면에 내린 강우는 차례로 지표면출구에서 유출로 나타나며, 상류방향의 경우는 하류방향의 경우와는 반대로 지표면출구에서부터 유출이 시작되므로 역방향으로 유출을 계산한다.

한편 이동강우와 정지강우로 인한 유출을 비교하기 위하여 정지강우의 경우는 이동강우와 강우강도가 동일하고 총유출량이 동일하게끔 강우주상도를 작성하여 그림 3에 나타내었으며, 각각의 강우이동속도에 해당하는 강우지속시간을 표시하였다.

3.2 적용 및 분석

200m(길이)×200m(폭)의 불투수층 지표면에서 그림 2의 이동강우와 그림 3의 정지강우를 적용하여 유출해석을 하였다. 공간적으로 분포하는 강우이동의

속도를 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0m/s로 변화시켜 유출해석한 결과를 강우이동속도 0.125, 0.5, 2.0m/s에 대하여 정지강우의 경우와 함께 그림 4~6에 나타내었고 이에 대한 침투유량(Q_p)과 그의 발생시간(T_p)는 표 1과 같다. 여기서 ()는 침투시간을 나타낸 것이다.

강우이동속도별로 수문곡선을 비교하면, 강우분포형에 대한 수문곡선의 모양은 강우이동속도가 느릴수록 큰 차이를 보이고 있다. 그 차이는 강우이동속도가 증가할수록 감소하며, 이것은 상류방향, 하류방향 뿐만 아니라 정지강우의 경우도 동일한 현상을 보인다. 균등분포형 이동강우의 경우 강우이동속도가 느리면 정상상태에 도달하게 되며, 강우강도가 시간적 공간적으로 변하는 전진형, 지연형, 중앙집중형의 경우는 정상상태에 도달하지 않았다. 반면에 정지강우의 경우는 균등분포형 강우의 강우지속시간이 짧으면 정상상태에 도달하지 않았다. 하류방향의 경우인 그림 4에서 지표면 하류에서의 유출시작은 강우이동속도와 지표면유속에 의하여 지체되어 나타났다.

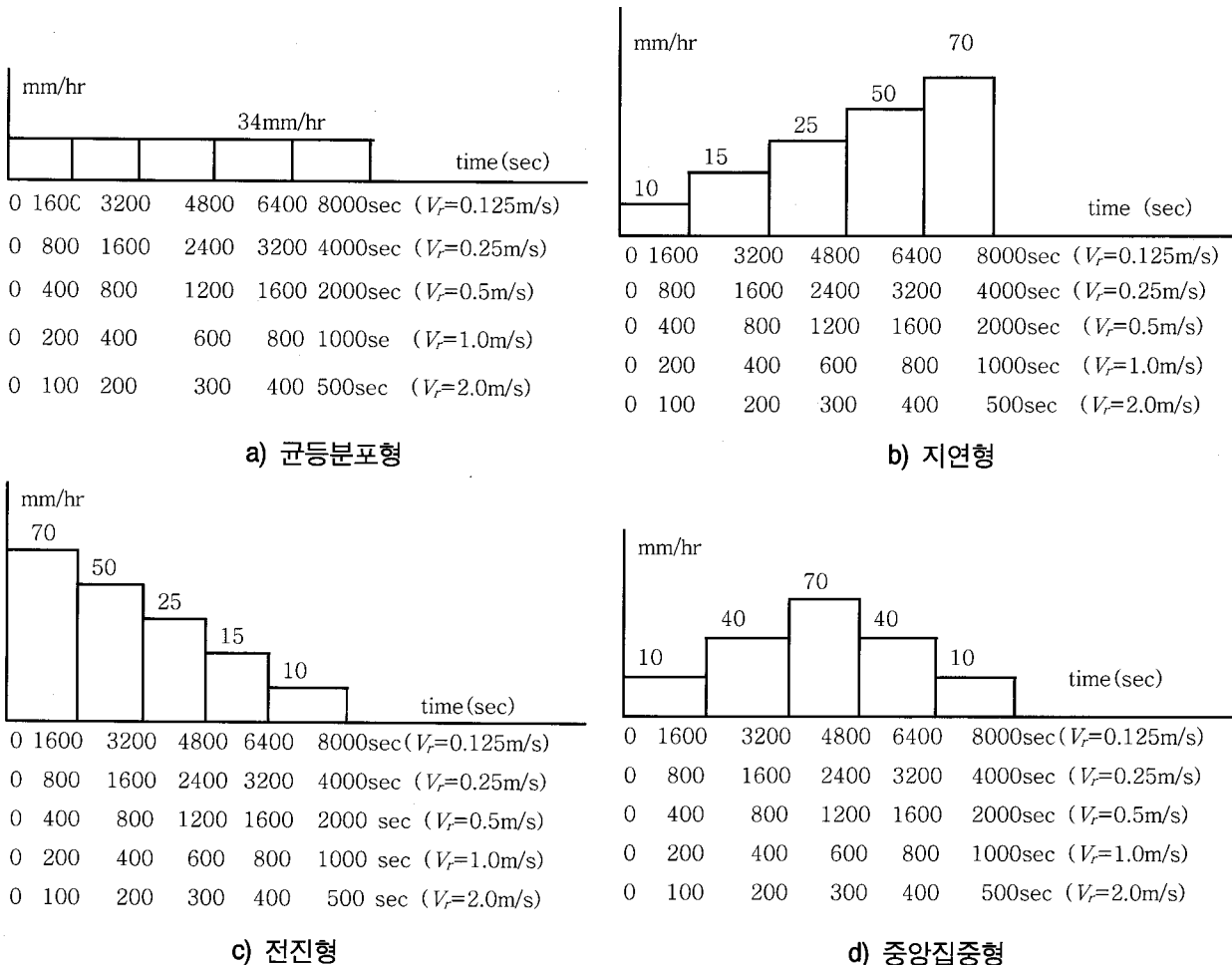


그림 3. 정지강우의 강우주상도

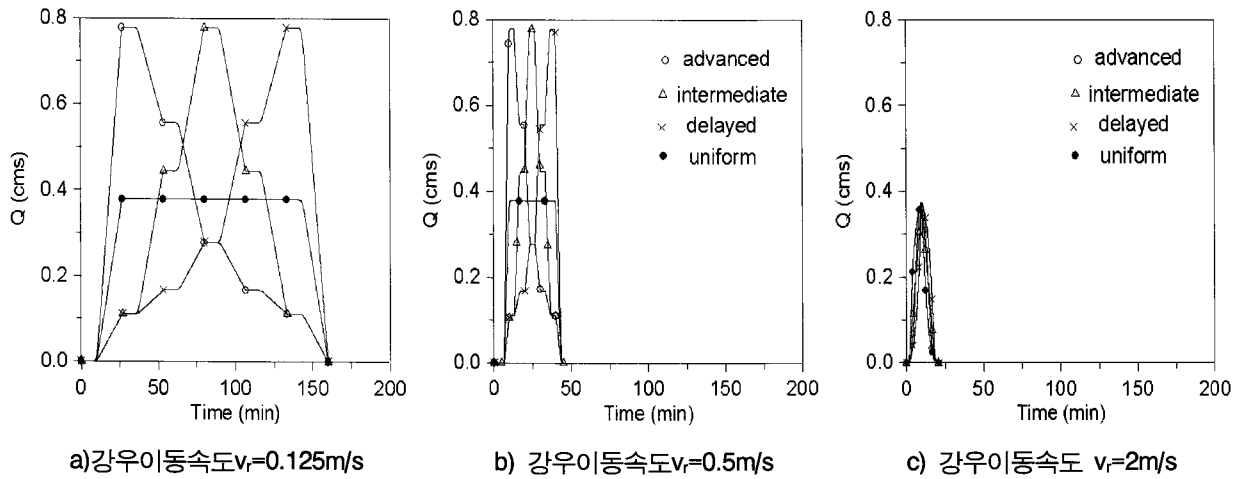


그림 4. 하류방향 지표면 수문곡선

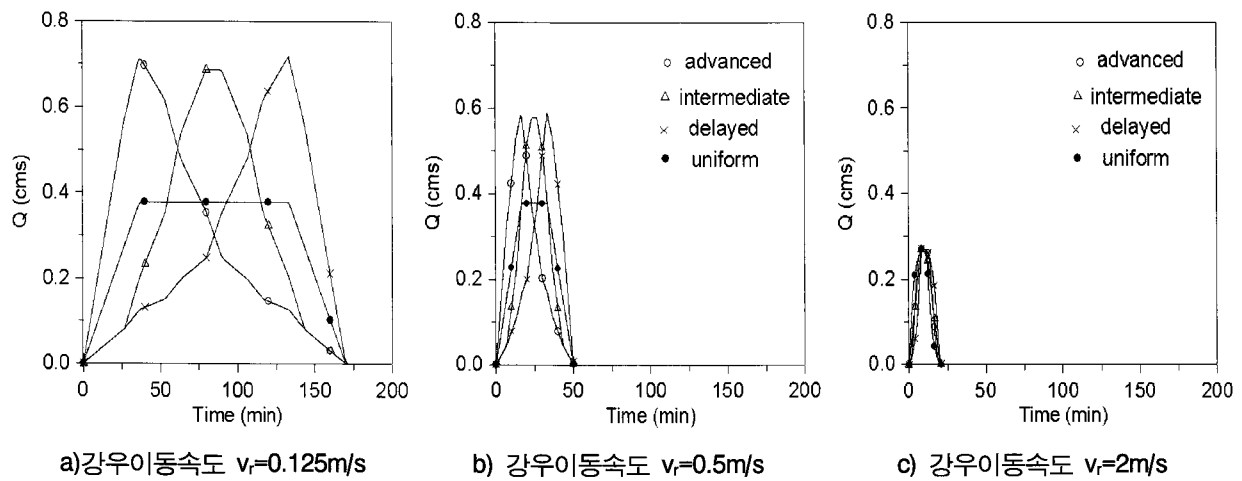


그림 5. 상류방향 지표면 수문곡선

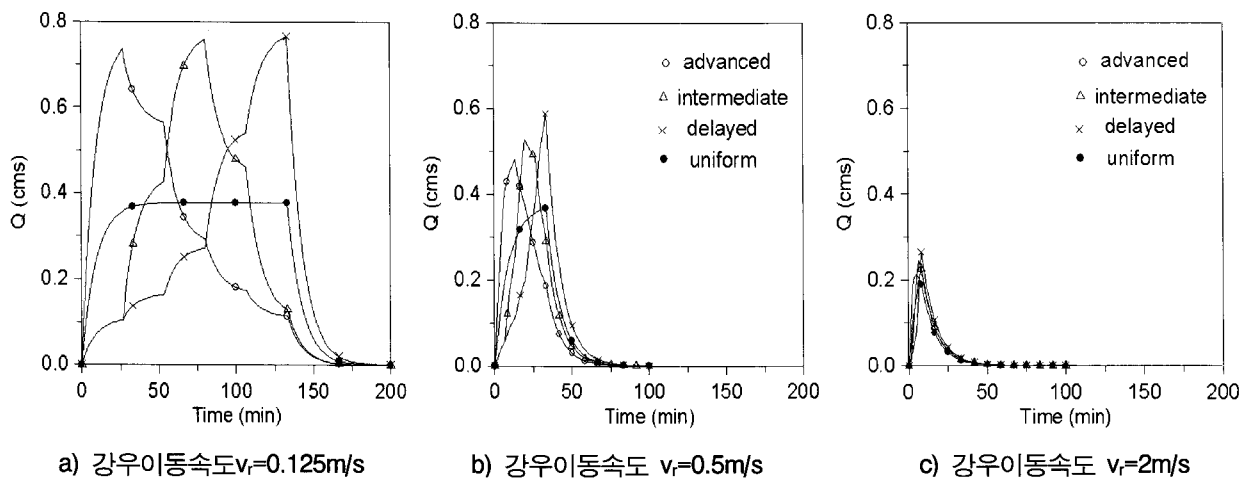


그림 6. 정지강우에 대한 지표면 수문곡선

하류방향의 침투유량이 강우분포형에 관계없이 가장 크게 나타났으며, 이에 대한 상대적인 크기를 표 1에 나타내었다. 강우이동속도가 빨라 질수록 하류방향에 대한 상류방향과 정지강우의 침투유량 차이가 점

차 확대됨을 알 수 있다. 강우분포형별로는 지연형에서 가장 큰 침투유량을 보여주고 있으며, 강우이동 방향별로는 하류방향보다 상류방향의 침투유량이 작으며 이것은 강우이동 방향과 지표면 유출방향이 상호 역

방향으로 인한 것으로 생각된다.

표 2는 강우이동속도에 따른 기저시간의 변화를 분석하기 위하여 강우이동속도 3m/s와 4m/s를 추가하여 정지강우의 경우와 함께 비교하였으며, 정지강우의 경우가 가장 길게 나타나고, 하류방향보다는 상류방향에서 더 길게 나타났다. 이를 그림 7에 나타내었으며, 강우이동속도가 빨라지면 상류방향과, 하류방향의 기

저시간이 같아짐을 알 수 있다.

그림 8, 9, 10은 강우이동속도에 대한 침투유량의 변화를 나타낸 그림이다. 강우이동속도가 빨라지면 강우분포형과 강우이동방향에 관계없이 침투유량이 점차 감소함을 알 수 있으며, 모든 강우분포형에서 동일한 침투유량값을 갖음을 알 수 있고, 이에 상응하는 정지강우의 경우도 동일한 현상을 보여주고 있다.

표 1. 침투유량과 침투시간 단위 ; 침투유량(cms), 침투시간(분)

강우이동속도(m/s)	강우이동방향	강우분포형				총유출량(m ³)
		균등분포형	전진형	지연형	중양집중형	
V _r =0.125	하류방향	0.3778(26.67)	0.7778(26.67)	0.7778(133.33)	0.7778(80.00)	3,022.0
	상류방향	0.3776(49.73) 99.95%	0.7106(37.20) 91.36%	0.7174(133.33) 92.23%	0.6872(80.00) 88.35%	
	정지강우	0.3778(133.33) 100%	0.7357(26.67) 94.59%	0.7649(133.33) 98.34%	0.7587(80.00) 97.54%	
V _r =0.25	하류방향	0.3778(13.33)	0.7778(13.33)	0.7778(66.67)	0.7778(40.00)	1,511.0
	상류방향	0.3776(26.40) 99.95%	0.6780(23.53) 87.72%	0.6828(66.67) 87.79%	0.6353(40.00) 81.70%	
	정지강우	0.3775(66.67) 99.92%	0.5969(13.33) 76.74%	0.7094(66.67) 91.21%	0.6808(40.00) 87.53%	
V _r =0.5	하류방향	0.3778(11.80)	0.7778(11.77)	0.7778(38.27)	0.7778(25.00)	755.5
	상류방향	0.3776(19.17) 99.95%	0.5819(16.50) 74.81%	0.5893(33.33) 75.56%	0.5778(25.67) 74.29%	
	정지강우	0.3679(33.33) 97.38%	0.4818(13.33) 61.94%	0.5876(33.33) 75.55%	0.5270(20.00) 67.75%	
V _r =1.0	하류방향	0.3778(12.32)	0.6398(9.98)	0.6571(19.98)	0.6111(15.08)	377.8
	상류방향	0.3776(15.53) 99.95%	0.4348(12.87) 67.96%	0.4437(16.67) 67.52%	0.4444(15.00) 72.72%	
	정지강우	0.3168(16.67) 83.85%	0.3348(6.67) 52.33%	0.4214(16.67) 64.13%	0.3777(13.33) 61.81%	
V _r =2.0	하류방향	0.3661(9.99)	0.3645(9.31)	0.3743(9.99)	0.3743(9.99)	188.9
	상류방향	0.2697(8.33) 73.67%	0.2698(8.33) 74.02%	0.2699(8.33) 72.11%	0.2699(8.33) 72.11%	
	정지강우	0.2260(8.33) 61.73%	0.2135(5.00) 58.57%	0.2639(8.33) 70.50%	0.2443(6.67) 65.27%	

표 2. 기저시간의 비교 (단위 : 분)

이동방향 \ 이동속도	하류방향	상류방향	정지강우
V _r =0.125 (m/s)	160.0	173.6	201.7
V _r =0.25 (m/s)	80.0	91.4	141.2
V _r =0.5 (m/s)	45.1	51.8	103.3
V _r =1.0 (m/s)	29.1	32.6	88.3
V _r =2.0 (m/s)	21.0	23.0	78.3
V _r =3.0 (m/s)	18.3	18.4	75.5
V _r =4.0 (m/s)	17.0	16.8	73.3

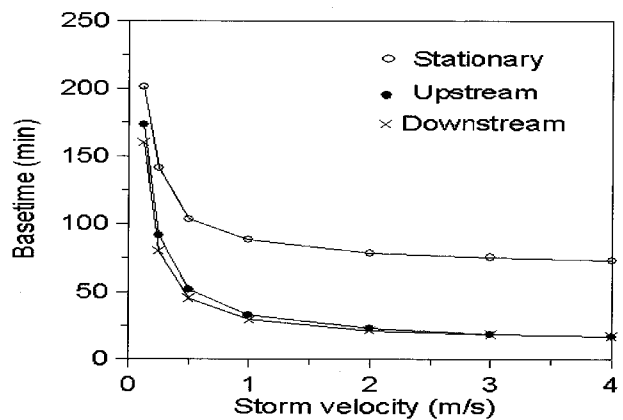


그림 7. 기저시간의 비교

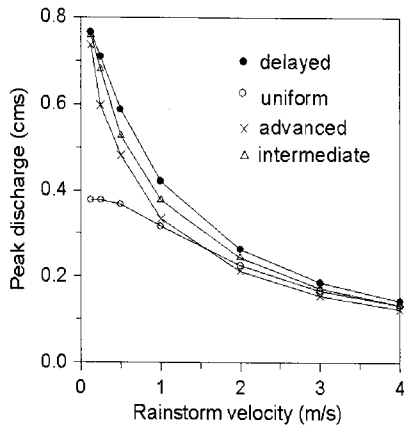


그림 8. 정지강우의 침투유량

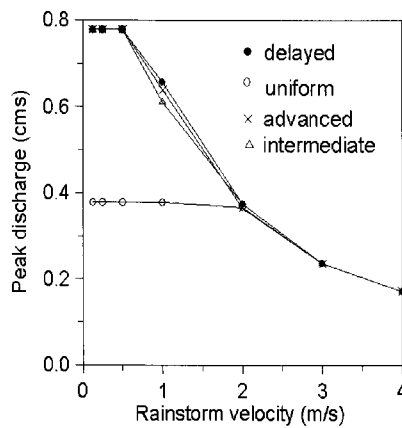


그림 9. 하류방향의 침투유량

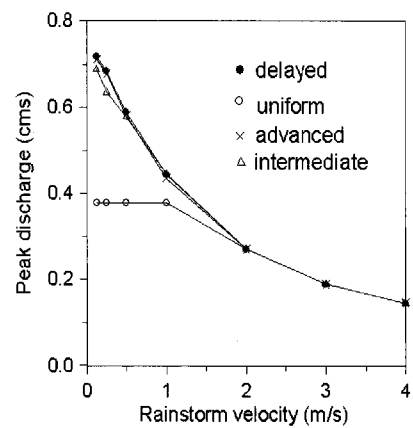


그림 10. 상류방향의 침투유량

그림 11, 12, 13은 강우이동속도에 대한 침투시간의 변화를 나타낸 것이며, 정상상태가 발생하는 균등 분포형은 제외하였다. 강우이동속도가 느릴 때는 지연형의 침투유량 발생시간이 가장 늦게 나타나고, 전진형의 침투유량 발생시간이 가장 빠르게 나타나다가 강우이동속도가 빨라지면 강우분포형에 관계없이 침투유량 발생시간이 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 이것은 하류방향과 상류방향뿐만 아니라 정지강우에서도 동일한 현상을 보여준다.

3.3 이동강우 길이의 변화에 의한 비교분석

총유출량(1511m³)이 일정한 경우 이동강우길이의 변화에 의한 수문곡선을 비교하기 위하여 강우강도를 일정하게 두고 이동강우의 길이를 변화시켰다. 강우의 이동속도에 비례하여 강우길이도 결정되며, 지표면의 크기와 강우분포형은 그림 1 및 그림 2와 동일하다.

그림 14~15는 강우이동속도 0.125~2.0m/s에 대하여 수문곡선을 비교한 것이며, 하류방향과 상류방향

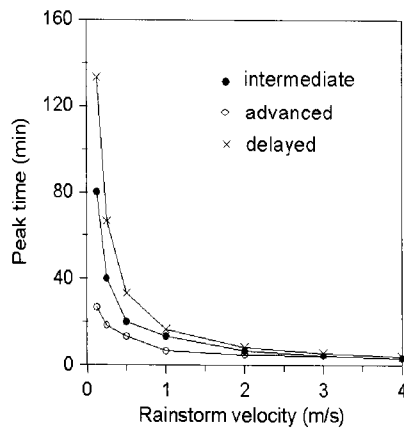


그림 11. 정지강우의 침투시간

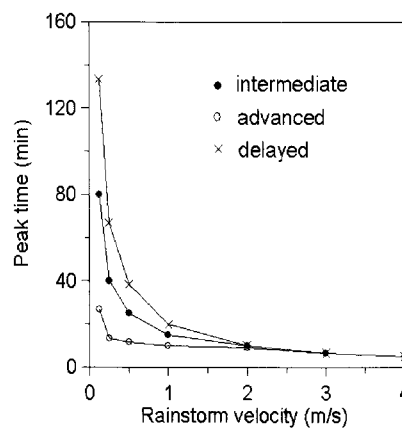


그림 12. 하류방향의 침투시간

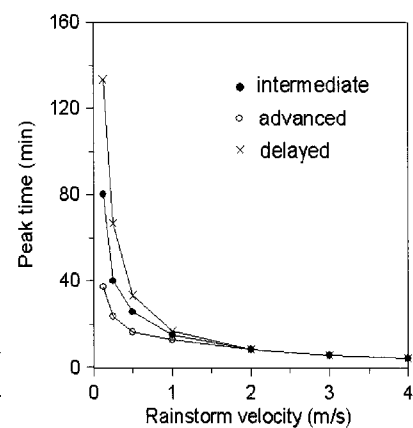


그림 13. 상류방향의 침투시간

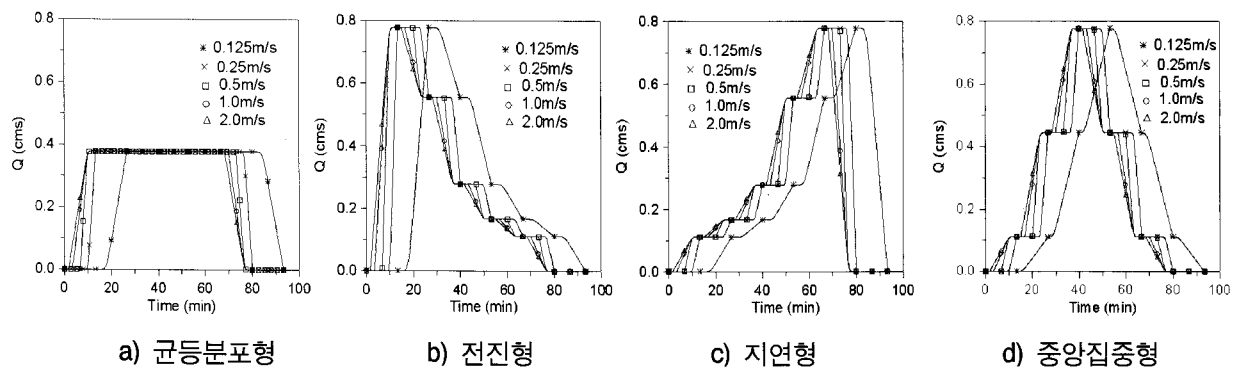


그림 14. 이동강우 길이 변화에 의한 수문곡선(하류방향)

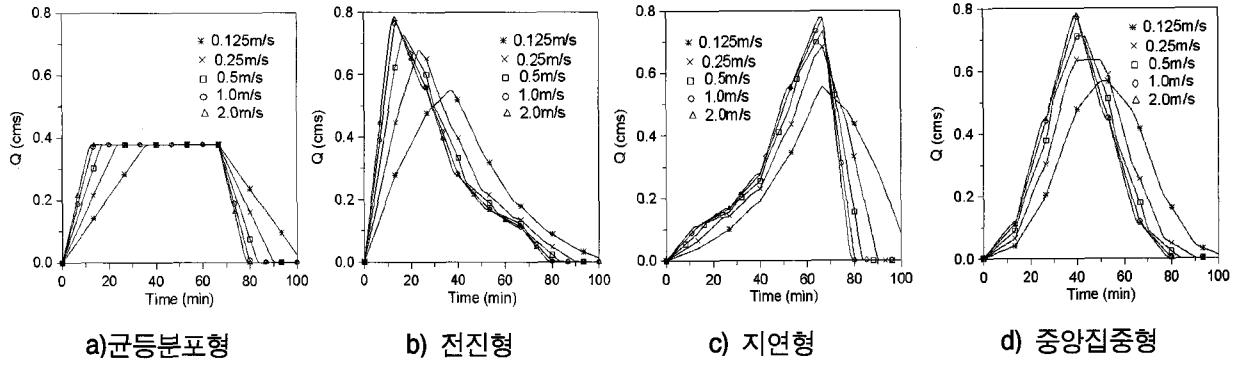


그림 15. 이동강우 길이 변화에 의한 수문곡선(상류방향)

표 3. 이동강우 길이의 변화에 의한 유출비교

강우분포형	이동속도 (m/s)	이동방향	시작점(분)	기저시간(분)	첨두시간(분)	첨두유량 (m ³ /s)	총유출량 (m ³)
균등분포형	0.125	하류방향	14.00	93.33	26.67	0.3778	1,511.0
		상류방향	-	114.40	40.90	0.3778	
	0.25	하류방향	8.27	80.00	13.33	0.3778	
		상류방향	-	91.20	26.13	0.3778	
	0.5	하류방향	6.67	78.33	11.80	0.3778	
		상류방향	-	84.54	18.27	0.3778	
	1.0	하류방향	3.33	79.00	12.33	0.3778	
		상류방향	-	82.20	15.53	0.3778	
	2.0	하류방향	1.67	79.20	12.40	0.3778	
		상류방향	-	80.40	14.00	0.3778	
전진형	0.125	하류방향	13.87	93.33	26.67	0.7778	1,511.0
		상류방향	-	106.80	36.93	0.5484	
	0.25	하류방향	8.27	80.00	13.33	0.7778	
		상류방향	-	91.07	23.53	0.6778	
	0.5	하류방향	6.67	78.20	11.80	0.7778	
		상류방향	-	84.60	16.87	0.7268	
	1.0	하류방향	3.33	78.80	12.33	0.7778	
		상류방향	-	82.00	13.67	0.7662	
	2.0	하류방향	1.67	79.00	12.47	0.7778	
		상류방향	-	80.60	13.33	0.7777	
자연형	0.125	하류방향	14.27	93.30	80.00	0.7778	1,511.0
		상류방향	-	107.20	66.67	0.5561	
	0.25	하류방향	8.27	80.00	66.67	0.7778	
		상류방향	-	91.30	66.67	0.6828	
	0.5	하류방향	6.67	78.40	64.93	0.7778	
		상류방향	-	84.93	66.67	0.7335	
	1.0	하류방향	3.33	79.13	65.47	0.7778	
		상류방향	-	82.33	66.67	0.7740	
	2.0	하류방향	1.67	79.40	65.47	0.7778	
		상류방향	-	80.93	66.67	0.7777	
중앙집중형	0.125	하류방향	12.13	93.30	53.33	0.7778	1,511.0
		상류방향	-	106.10	53.33	0.5657	
	0.25	하류방향	8.27	80.00	40.00	0.7778	
		상류방향	-	91.07	40.00	0.6353	
	0.5	하류방향	6.67	78.20	38.33	0.7778	
		상류방향	-	84.67	40.00	0.7114	
	1.0	하류방향	3.33	78.73	38.87	0.7778	
		상류방향	-	82.00	40.00	0.7721	
	2.0	하류방향	1.67	79.00	38.93	0.7778	
		상류방향	-	80.60	40.00	0.7777	

에 대한 침투유량과 침투시간, 기저시간을 표 3에 나타내었다. 하류방향으로의 이동강우에 대한 침투유량은 상류방향보다 크게 나타났으며, 균등분포형에서는 상류 및 하류방향의 침투유량이 같게 나왔다. 하류방향으로 강우이동속도가 빠르면 유출시작점은 더 빨리 나타났으나 기저시간의 변화는 미미하였다. 기저시간은 하류방향보다 상류방향의 경우가 더 길게 됨을 알 수 있으며, 상류방향으로는 강우이동속도가 빠를수록 기저시간이 점차 짧아지는 변화를 보여주고 있다. 상류방향으로의 이동속도가 빠를수록 침투유량이 점차 커지며, 상류방향에서는 지연형의 침투유량이 가장 크게 나타났다.

3.4 이동강우강도 변화에 의한 비교분석

총유출량(1511m³)이 일정한 경우 이동강우 강도의 변화에 의한 수문곡선을 비교하기 위하여 이동강우 길이를 일정하게 두고 강우강도를 변화시켰으며, 강우의 이동속도에 비례하여 강우강도가 결정된다. 그림 16~17은 강우이동속도 0.125~2.0m/s에 대하여 수문곡선을 비교한 것이며, 하류방향과 상류방향에 대한 침투유량과 침투시간, 기저시간을 표 4에 나타내어 비교하였다. 침투유량, 침투유량 발생시간, 기저시간을 포함한 수문곡선의 모양은 강우이동속도에 따라

현저하게 다른 모양을 나타내고 있다. 강우분포형에 관계없이 강우이동속도가 빠르면 침투유량이 커지며, 유출시작점이 빨라지고, 기저시간은 짧아지며, 이것은 상류방향 및 하류방향에서 공통되게 나타났다. 하류방향의 이동강우로 인한 침투유량이 상류방향보다 크게 나타나며, 이것은 강우이동속도에 강하게 영향을 받는다. 유출시작시점은 하류방향에서는 강우분포형에 관계없이 강우이동속도에 따라서 변하여 이동속도가 빨라지면 유출시점도 빨라지며, 상류방향에서는 강우시작과 동시에 유출이 발생하였다.

그림 18은 강우이동속도에 따르는 유출시점과 기저시간을 표시한 그림이다. 유출시점은 이동속도에 따라 점차 빨라짐을 알 수 있으며, 강우길이를 변화시킨 경우 상류방향 및 하류방향의 기저시간의 변화는 근소하였으나, 강우강도를 변화시켰을 때는 상류방향과 하류방향 모두 기저시간이 급격히 짧아짐을 알 수 있다. 그림 19는 상류방향에 대한 강우이동속도의 변화에 따르는 침투유량의 변화를 나타낸 그림이며, 균등분포는 이동속도에 따라 동일한 값이므로 제외하였다. 지연형 이동강우의 침투유량이 가장 크게 나타남을 볼 수 있으며, 강우이동속도가 빨라짐에 따라 침투유량이 급격히 증가하여 강우분포형에 관계없이 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다.

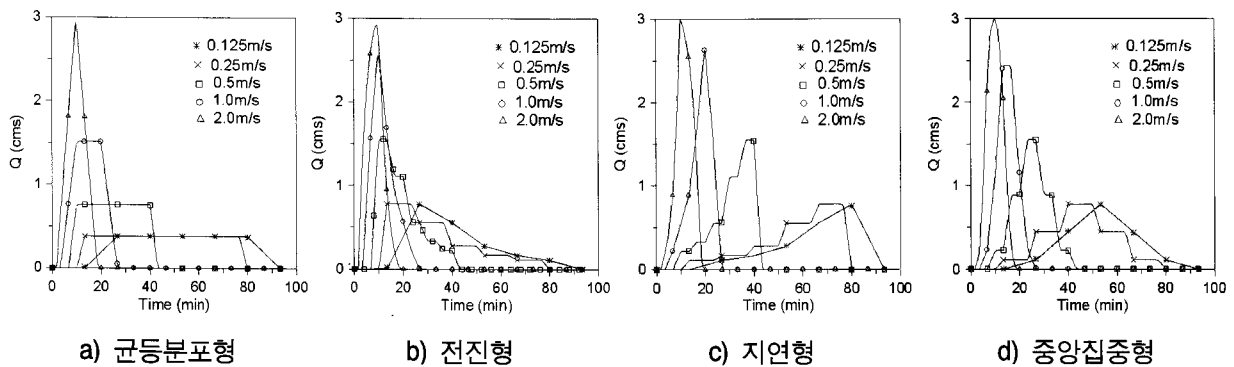


그림 16. 이동강우 강도 변화에 의한 수문곡선(하류방향)

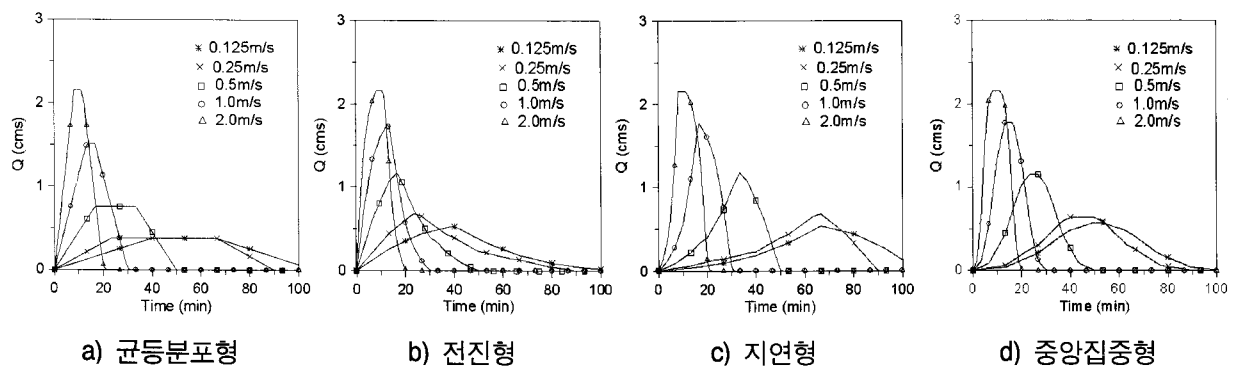


그림 17. 이동강우 강도 변화에 의한 수문곡선(상류방향)

표 4. 이동강우 강도의 변화에 의한 유출비교

강우분포형	이동속도 (m/s)	이동방향	시작점(분)	기저시간(분)	침투시간(분)	침투유량 (m ³ /s)	총유출량 (m ³)		
균등분포형	0.125	하류방향	9.87	93.20	26.67	0.3778	1,511.0		
		상류방향	-	110.13	47.47	0.3778			
	0.25	하류방향	8.73	79.93	13.33	0.3778			
		상류방향	-	91.33	26.13	0.3778			
	0.5	하류방향	6.67	45.00	11.80	0.7556			
		상류방향	-	51.60	18.27	0.7556			
	1.0	하류방향	3.33	28.80	12.33	1.5111			
		상류방향	-	32.60	15.53	1.5111			
	2.0	하류방향	1.73	21.20	10.00	2.9273			
		상류방향	-	23.20	8.33	2.1590			
	전진형	0.125	하류방향	9.73	93.30	26.67		0.7715	1,511.0
			상류방향	-	109.30	39.60		0.5302	
0.25		하류방향	8.60	79.93	13.33	0.7778			
		상류방향	-	91.33	23.53	0.6780			
0.5		하류방향	6.67	44.70	11.80	1.5555			
		상류방향	-	51.40	16.47	1.1637			
1.0		하류방향	3.33	28.80	10.00	2.5580			
		상류방향	-	32.20	12.87	1.7393			
2.0		하류방향	1.67	21.00	9.99	2.9161			
		상류방향	-	22.60	8.33	2.1588			
지연형		0.125	하류방향	10.27	93.33	79.47	0.7591	1,511.0	
			상류방향	-	109.90	66.67	0.5366		
	0.25	하류방향	8.60	79.93	66.67	0.7778			
		상류방향	-	91.53	66.67	0.6828			
	0.5	하류방향	6.67	44.93	28.27	1.5550			
		상류방향	-	51.40	33.33	1.1786			
	1.0	하류방향	3.33	29.00	20.00	2.6241			
		상류방향	-	32.53	16.67	1.7747			
	2.0	하류방향	1.73	21.20	10.00	2.9943			
		상류방향	-	23.00	8.33	2.1593			
	중앙집중형	0.125	하류방향	10.27	93.33	53.33	0.7684		1,511.0
			상류방향	-	105.30	52.67	0.5684		
0.25		하류방향	8.53	79.93	40.00	0.7778			
		상류방향	-	91.33	40.00	0.6353			
0.5		하류방향	6.67	44.93	25.00	1.5550			
		상류방향	-	51.40	25.67	1.1556			
1.0		하류방향	3.33	29.00	15.07	2.4443			
		상류방향	-	32.20	15.00	1.7777			
2.0		하류방향	1.73	20.80	10.00	2.9941			
		상류방향	-	22.67	8.33	2.1588			

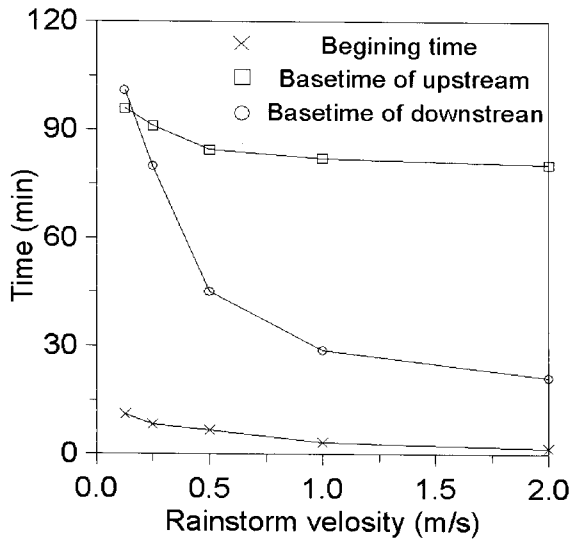


그림 18. 강우이동속도에 따르는 유출 시작점과 기저시간

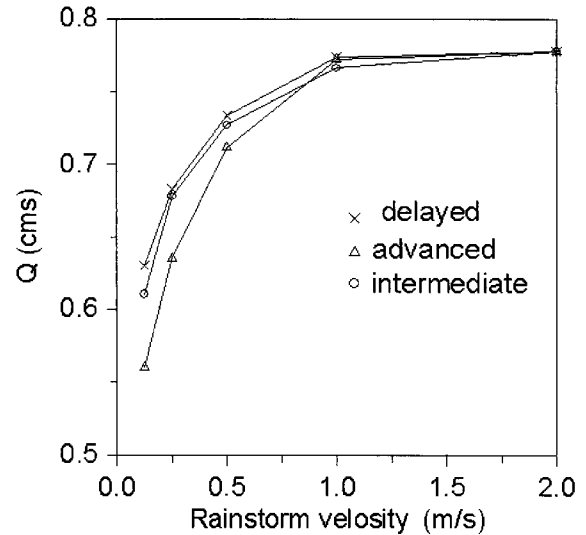


그림 19. 강우길이 변화시 강우이동속도에 따르는 첨두유량의 변화(상류방향)

4. 결론

본 연구에서는 시간적, 공간적으로 분포하는 강우에 대하여 단순화한 지표면 모형구역에서 임의속도로 강우를 상류방향, 하류방향으로 이동시키므로서 유출해석을 하여 정지강우의 경우와 비교하였다. 이때 이동강우에 대한 수문학적 응답을 평가하기 위하여 공간적 길이를 갖는 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형의 4가지 강우분포형을 적용하였으며, 운동과방정식을 사용하여 수치해석하였다.

지표면 유출수문곡선의 모양과 첨두유량은 강우 분포형에 대하여 강한 영향을 받으며, 또한, 이것은 강우이동방향과 강우이동속도에도 영향을 받을 수 있다. 강우이동속도가 느릴수록 첨두유량이 커지고 기저시간이 길어지며, 강우이동속도가 빠를수록 첨두유량 발생시간이 빨라지고 유출이 일찍 시작하여 빨리 끝났다. 강우가 상류방향으로 이동할 때는 수문곡선 상승시점이 빨라지고 상승곡선이 완만하게 된다. 강우분포형의 경우는 균등분포형에서 첨두유량이 가장 작게 나타나고 지연형에서 대체로 첨두유량이 가장 크게 나타났으며, 강우분포형에 대한 유출의 민감도는 강우이동속도가 빠를수록 감소함을 알 수 있다. 강우이동속도가 느릴 때는 지연형강우의 첨두유량 발생시간이 가장 늦게 나타나고, 전진형강우의 첨두유량 발생시간이 가장 빠르게 나타나다가 강우이동속도가 빨라지면 강우분포형에 관계없이 첨두유량 발생시간이 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- 최계운, 강희경, 박용섭 (2000) GIS를 활용한 유역내 이동강우에 의한 유출특성 연구. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권 제6호, pp. 793-804.
- 최계운, 이희승, 안상진 (1992) 분포형모형을 이용한 유역내 이동강우의 유출해석. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제25권 제1호, pp. 101-109.
- 한건연, 전민우, 김지성 (2006) 유역형상에 따르는 이동강우의 유출영향분석 (1). 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 26권 제1B호, pp. 15-25.
- 한건연, 전민우, 최규현 (2004) 이동강우에 의한 유출영향분석. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권 제10호, pp. 823-836.
- de Lima, JLMP, and Singh, V. P. (1999) The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow laboratory experiments under simulated rainfall. *Water Resources publications*, pp. 101-111.
- de Lima, JLMP and Singh, V. P. (2003) Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow. *Physics*

- and Chemistry of the Earth*, Vol. 28, pp. 277-282.
- Kirby, M. J. (1978) *Hillslope hydrology*. John Wiley & Sons.
- Maksimov, V. A. (1964) Computing runoff produced by a heavy rainstorm with a moving center. *Sov. Hydrol.*, Vol. 5, pp. 510-513.
- Marcus, N. (1968) *A laboratory and analytical study of surface runoff under moving rainstorms*, Ph.D. dissertation, University of Illinois.
- Ngirane-Katashaya, G. G., H. S. Wheater(1985) Hydrograph Sensitivity to Storm Kinematics. *Water Resour. Resear.*, Vol. 21, pp. 337-345.
- Ogden, F. L., Richardson, J. R. and Julien, P. Y. (1995) Similarity in catchment response, 2. Moving rainstorms. *Water Resour. Resear.*, Vol. 31, No. 6, pp. 1543-1547.
- Richardson, J. R. (1989) *The effect of moving rainstorms on overland flow using one-dimensional finite elements*, Ph.D. dissertation, Colorado State Univ., Colorado.
- Singh, V. P. (1997) Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph. *Hydrol. Prosess.*, Vol. 11, pp. 1649-1669.
- Singh, V. P. (1998) Effect of the direction of storm movement on planar flow. *Hydrol. Prosess.*, Vol. 12, pp. 147-170.
- Singh, V. P. (2002a) Effect of the duration and direction of storm movement on planar flow with full and partial areal coverage. *Hydrol. Prosess.*, Vol. 16, pp. 3437-3466.
- Singh, V. P. (2002b) The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow. *Advances in Water Resources*, Vol. 25, pp. 817-828.

© 논문접수일 : 2007년 08월 09일

© 심사의뢰일 : 2007년 08월 10일

© 심사완료일 : 2007년 10월 16일