

이동강우에 의한 유출영향분석

Runoff Analysis due to the Moving Storm

한 건 연* / 전 민 우** / 최 규 현***

Han, Kun Yeun / Jeon, Min Woo / Choi, Kyu Hyun

Abstract

Using the simple geometry for the idealized catchment consisting of two plane surfaces and a stream between them, runoff was analysed for the moving storms based on the kinematic wave equation. The storm velocity applied in this study was 0.25~2.0 m/s moving up, down and cross direction of catchment. Applied rainfall distribution types are uniform, advanced, delayed, intermediate type. The results indicate that the moving storms of cross direction generate the largest peak runoff, and the smallest runoff appears in the case of up stream direction. The sensitivity of runoff to rainfall distribution types decreases as storm velocity increases. It is clear that faster storm velocity generates faster peak time and becomes thin hydrographs rapidly.

Keywords : moving storm, rainfall distribution types, kinematic wave equation, cross direction, upstream direction

요 지

두개의 지표면과 그 사이에 있는 하도로 이루어진 유역을 가정하여 이동강우에 대한 유출을 운동파이론을 적용함으로서 해석하여 다양한 강우이동속도의 경우를 비교분석하였다. 이동강우는 하천의 상류방향, 하류방향, 횡방향으로 0.25~2.0m/s의 속도로 이동시켰으며, 이때 강우분포형은 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형을 적용하였다. 횡방향 이동강우의 경우에 첨두유량이 가장 크게 나타났고, 상류방향의 이동강우에 대한 첨두유량이 가장 작게 나타났다. 강우분포형에 대한 유출의 민감도는 강우이동속도가 빠를수록 감소하였다. 강우이동속도가 빠를수록 첨두시간이 빨라지며, 수문곡선은 급격히 얇아짐을 알수 있다.

핵심용어 : 이동강우, 강우분포형, 운동파 방정식, 횡방향, 상류방향

1. 서 론

유출수문곡선은 강우량, 강우강도, 강우지속기간, 강우이동방향 및 속도와 같은 강우특성과 공간적 변화에 의하여 영향을 받으며, 특히 강우의 시간적, 공간적 분포는 유출에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 이와 같

은 강우의 시간적, 공간적 분포는 이동강우의 진행방향, 속도, 길이 그리고 강우분포형에 의하여 나타내어질수 있다. 강우의 진행방향은 단순화를 위하여 하도를 기준으로 하여 하류방향(흐름방향), 상류방향(흐름의 역방향), 횡방향으로 구별할 수 있다.

이동강우에 대한 연구는 Maksimov(1964)에 의하여

* 경북대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea (E-mail: kshanj@knu.ac.kr)

** 충북대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Eng., Chungbuk National Univ., Chungju 361-763, Korea (E-mail: minwoo@chungbuk.ac.kr)

*** 경북대학교 토목공학과 박사과정 수료

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea (E-mail: hydro2k@hitech.net)

처음 이루어 졌으며, Marcus(1968)가 이동강우에 대한 실험적 연구를 한 이후 이동강우가 유출에 미치는 영향은 많은 연구가 이루어져 왔다(Roberts와 Klingeman, 1970; Surkan, 1974; Ngirane-Katashaya와 Wheater, 1985). Ogden 등(1995)은 강우이동속도와 강우길이를 무차원화하므로서 2차원 강우-유출모형을 사용하여 유출을 모의하였으며, Singh(1998)은 지표면에서 강우 이동방향의 영향을 분석하였다. 최근 Lima와 Singh(1999)은 직4각형 지표면에 대하여 이동강우가 유출에 미치는 영향을 분석하였으며, Singh(2002a)은 운동파방정식을 적용하여 이동강우의 영향에 관한 해석적 해를 도출하였고, Singh(2002b)는 이동강우의 분포형이 유출수문곡선에 미치는 영향을 연구하였다.

국내에서는 최계운 등(1992)이 이동강우해석을 위한 분포형모델을 개발한 연구가 있고, 최계운 등(2000)은 실제유역에서 GIS를 이용한 이동강우의 영향을 분석하였다. 이와 같은 대부분의 연구들은 운동파이론을 적용하였으며, 유역의 홍수추적은 Saint-Venant방정식에 의하여 이상적으로 나타내어 지나, 운동파모델은 지표면 흐름뿐만 아니라 하도흐름에도 매우 빠르고 신뢰성 있는 결과를 준다(Singh, 1996).

지금까지의 이동강우에 대한 유출영향분석은 지표면 유출에 대한 상류방향과 하류방향의 이동강우에 대한 것이 대부분이었으며, 본 연구에서는 지표면과 하도의 형상과 특성을 단순화하여 2개의 직4각형 지표면과 그 지표면 사이에 있는 하천으로 이루어진 유역을 가정하고, 설정된 강우분포형을 갖는 이동강우가 유출수문곡선에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 다양한 진행속도를 가진 강우가 유역내 하천의 상류방향, 하류방향, 횡방향으로 이동할 때 유출수문곡선을 모의하여 그 특성을 비교분석하였고 이때 지배방정식으로서 운동파이론을 적용하였다.

2. 지배방정식

강우로 인한 지표면유출은 하천으로의 측방향유입이 되며, 개수로 흐름문제에서 비정상흐름으로 간주될 수 있다. 1차원 비정상 개수로흐름의 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된 Saint-Venant 방정식이다. 보존식형태의 Saint-Venant 방정식을 사용하여 관성력과 압력항을 무시할 경우 운동파(Kinematic wave)가 흐름을 지배하게 되며, 지표면 흐름에 대한 연속방정식과 운동량방정식은 각각 식 (1),(2)와 같다.

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

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

여기서 t =시간(sec), x =지표면 흐름방향으로의 거리(m), q =단위폭당 유량(m^3/s), h =지표면 수심(m), ℓ =측방향유입량으로서 지표면흐름의 경우 공간적, 시간적으로 변화하는 유효강우(m/s)이며, 이때 Manning의 등류공식을 적용하면 $\alpha = \frac{\sqrt{S_f}}{N}$ (N =조도계수, S_f =마찰경사), $\beta=5/3$ 가 된다.

식 (1)의 연속방정식과 식 (2)의 운동량방정식이 지표면흐름의 지배방정식이 된다. 식 (2)의 q 를 h 에 대하여 미분하여 식 (1)에 대입하면 운동파방정식 (3)을 얻을 수 있으며, 이때 V_p 는 지표면흐름의 평균유속이다.

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

하도흐름의 경우 연속방정식과 운동량방정식은 각각 식 (4),(5)와 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_\ell \quad (4)$$

$$Q = a A^b \quad (5)$$

여기서 y =하도 흐름방향으로의 거리, Q =유량(m^3/s), A =흐름단면적(m^2), q_ℓ =측방향유입량(m^2/s)으로서 하도 흐름의 경우 지표면으로부터의 유입량이다. 이경우 Manning의 등류공식에 의하여 $a = \frac{\sqrt{S_f}}{NP^{2/3}}$, $b=5/3$ 가 되며, 이때 P 는 윤변이다.

식 (4)의 연속방정식과 식 (5)의 운동량방정식이 하도흐름의 지배방정식이 된다. 식 (5)의 Q 를 A 에 대하여 미분하여 식 (4)에 대입하면 운동파방정식 (6)을 얻을 수 있으며, 이때 V_c 는 하도흐름의 평균유속이다.

$$\frac{\partial Q}{\partial y} (b V_c) + \frac{\partial Q}{\partial t} = q_\ell b V_c \quad (6)$$

유한차분법을 이용하여 운동파방정식을 수치해석하는 방법에는 여러가지가 알려져 있으나, 2차精度보다 안정성이 있는 1차精度 수치해법을 사용하여 식 (3)과 식 (6)을 이산화 시키면 지표면흐름과 하도흐름에 대하여 각각 식 (7),(8)과 같다.

$$q_{i+1}^{n+1} = (1 - C_p) q_{i+1}^n + C_p q_i^n + C_p \Delta x \ell \quad (7)$$

$$Q_{i+1}^{n+1} = \left(1 - \frac{1}{C_c}\right) Q_i^{n+1} + \frac{1}{C_c} Q_i^n + \Delta y q_\ell \quad (8)$$

여기서 Courant수 C 는 지표면흐름의 경우 $C_p = \frac{\beta V_p \Delta t}{\Delta x}$ 이며, 하도흐름에서는 $C_c = \frac{b V_c \Delta t}{\Delta y}$ 이다. 이 때 지표면흐름에 대하여는 forward-in-time, backward-in-space 차분법을 사용하였으며, 안정해를 얻기 위하여 $C_p \leq 1$ 의 조건을 만족해야 한다. 반면에 하도흐름에서는 forward-in-space, backward-in-time 차분법을 사용하고 $C_c \geq 1$ 의 조건을 만족해야 한다. 여기서 i =공간격자점, n =시간격자점을 나타낸다.

3. 모형유역 및 이동강우의 분포형태

3.1 모형유역

본 연구에서는 시간적으로 변하지 않는 강우가 유역을 일정한 속도로 종횡단이동하는 경우, 이로 인한 유출의 영향을 분석하고자 하며, 종단의 경우는 하도흐름과 동일방향과 역방향 이동강우에 대하여 유출을 구하였다. 이와 같은 이동강우의 영향은 유역의 물리적 특성에 따라 변하겠으나 본 연구에서는 강우강도의 공간적 분포형태와 강우의 진행방향과 이동속도에 주안점을 두었으며, 지표면과 하도의 형상과 특성을 단순화하여 그림 1에 나타내었다. 2개의 직4각형 지표면으로 이루어진 유역을 가정하고, 이 유역으로부터의 유출은 지표

면사이에 있는 하천으로 측방향유입된다. 각 지표면은 폭100m, 길이200m이며, 지표면에서의 평균유속은 0.15 m/s이고 하천의 평균유속은 1.5m/s라 가정하였다.

3.2 강우분포형

강우의 시간적 분포양상은 유출수문곡선의 모양을 결정하는 중요한 요소이며, 대체로 중앙집중형이 가장 큰 첨두유량을 주는 것으로 알려져 있다. 강우의 시간적 변화는 강우주상도에 의하여 표현되지만, 본 연구에서는 시간적으로 일정한 분포형을 가진 강우가 유역을 이동하는 경우 유역의 거동을 분석하였으며 간편성을 위하여 손실강우는 고려하지 않았다.

이동강우에 대한 수문학적 응답을 구하기 위하여, 일정한 길이를 가진 강우가 공간상에서 이동하는 측방향 유입을 고려하며, 이것은 강우의 이동속도에 의하여 지표면유출에 기여하는 강우의 시간적 분포를 내포한다. 동일한 총강우량이라 할지라도 강우의 공간적 분포형에 따라 수문곡선이 달라지며, 강우의 공간적 분포형을 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형으로 설정하여 그림 2에 나타내었으며, 모든 경우 강우의 크기는 1000m(길이)×200m(폭)이다.

균등분포형 강우가 그림 1의 유역을 이동하는 경우 강우강도(측방향유입)를 그림 3에 나타내었다.

$$\text{이동강우가 지표면에 강하한 전체시간은 } D = \frac{L + L_r}{V_r}$$

이고, 이동강우가 지표면에 강하한 전체 강우량은

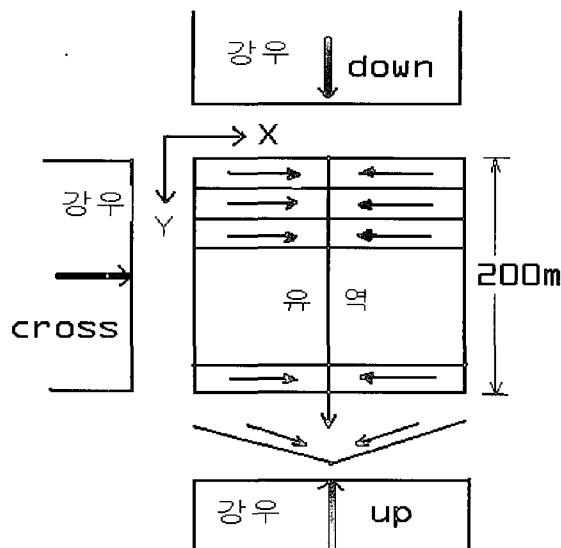
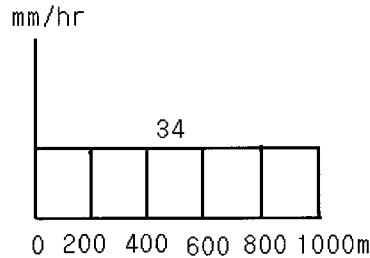
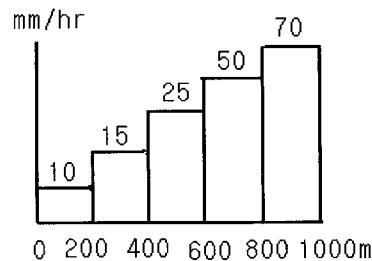


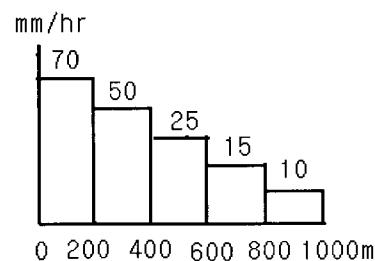
그림 1. 이동강우해석을 위한 개념도



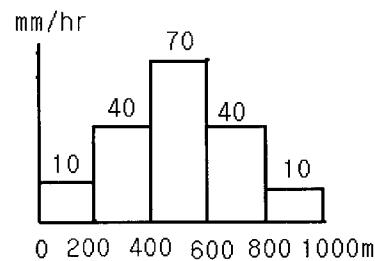
(a) 균등분포형 강우



(b) 전진형 강우



(c) 지연형 강우



(d) 중앙집중형 강우

그림 2. 이동강우의 공간적 분포형

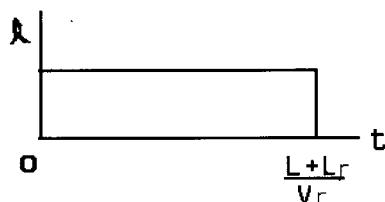


그림 3. 균등분포형의 강우강도

$R = \ell \frac{L_r}{V_r}$ 이다. 여기서 L =유역의 길이(m), L_r =강우의 길이(m), V_r =강우이동속도(m/s), D =강우강하시간(sec), R =전체강우량(m)이다. 이동강우에 의한 유출을 모의하기 위하여 Δx 또는 Δy 로 이산화한 유역을 Δt 시간씩 강우를 이동시키므로 유출추적을 하였다. 강우의 이동속도는 횡방향의 경우 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, 종방향의 경우 $\frac{\Delta y}{\Delta t}$ 로서 나타내었으며, 속도범위는 $V_r=0.25\sim2.0\text{m/s}$ 를 사용하였다.

하류방향의 경우, 최상류지표면에 내린 강우는 하도록률을 이루어 차례로 유역출구에서 유출로 나타나며, 상류방향의 경우는 하류방향의 경우와는 반대로 유역출구에 있는 지표면에서부터 유출이 시작되므로 역방향으로 유출을 계산한다. 반면에 횡방향의 경우는 x방향 지표면의 중간까지는 강우이동방향과 지표면흐름이 같은 방향이 되지만 그 이후는 강우이동방향과 반대방향으로

지표면유출이 발생한다.

4. 적용 및 분석

4.1 강우강도와 강우길이가 동일한(총강우량이 변하는) 이동강우

강우이동속도가 변하더라도 강우강도와 강우길이가 변하지 않는 경우이며, 이때는 강우이동속도에 따라 유역에 강하한 총강우량이 변하는 경우이다.

200m×200m의 유역에 각각 다른 분포형을 갖는 강우를 종횡단 이동시켰다. 공간분포하는 이동강우의 영향을 분석하기 위하여 그림 2의 4가지 강우분포형에 대하여 유출모의를 하였다. 그 결과를 강우이동속도 $V_r=0.25, 0.5, 1.0, 2.0\text{m/s}$ 그리고 상류방향, 하류방향, 횡방향에 대하여 그림 4~6에 나타내었으며, 이에 대한 첨두유량 Q_p 과 첨두시간 t_p 의 분석결과를 표 1에 나타내었다.

4가지 강우분포형 모두 같은 크기의 유효강우강도 (170 mm/hr)를 가지며, 따라서 강우이동속도가 같은 경우, 모든 분포형의 총유출량은 동일한 값을 갖는다. 강우분포형에 대한 수문곡선을 비교하면 강우이동속도가 느릴수록 수문곡선 모양(첨두유량과 첨두시간)에 큰 차이를 보여주고 있다. 그 차이는 강우이동속도가 증가할수록 감소하고 있으며, 이것은 상류방향과 하류방향 그리고 횡방향 모두 동일한 현상을 나타낸다.

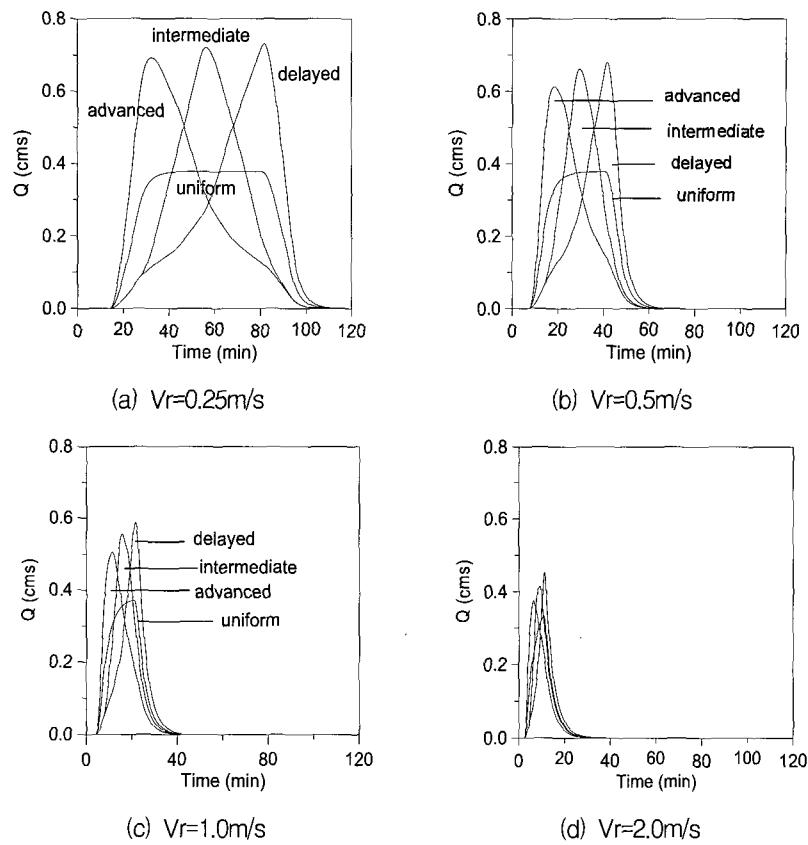


그림 4. 하류방향 이동강우에 대한 수문곡선

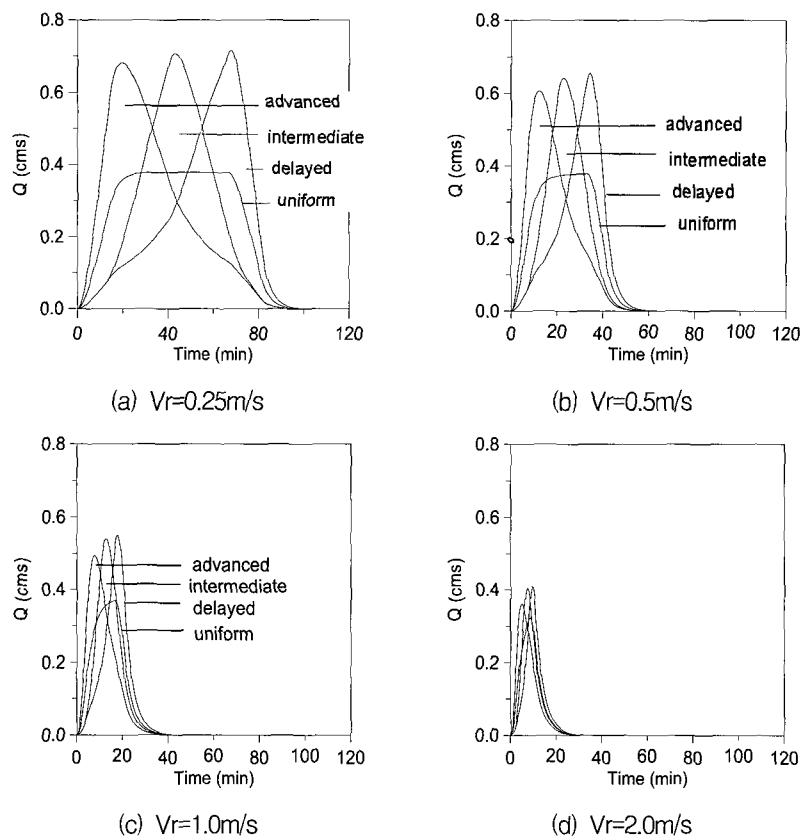


그림 5. 상류방향 이동강우에 대한 수문곡선

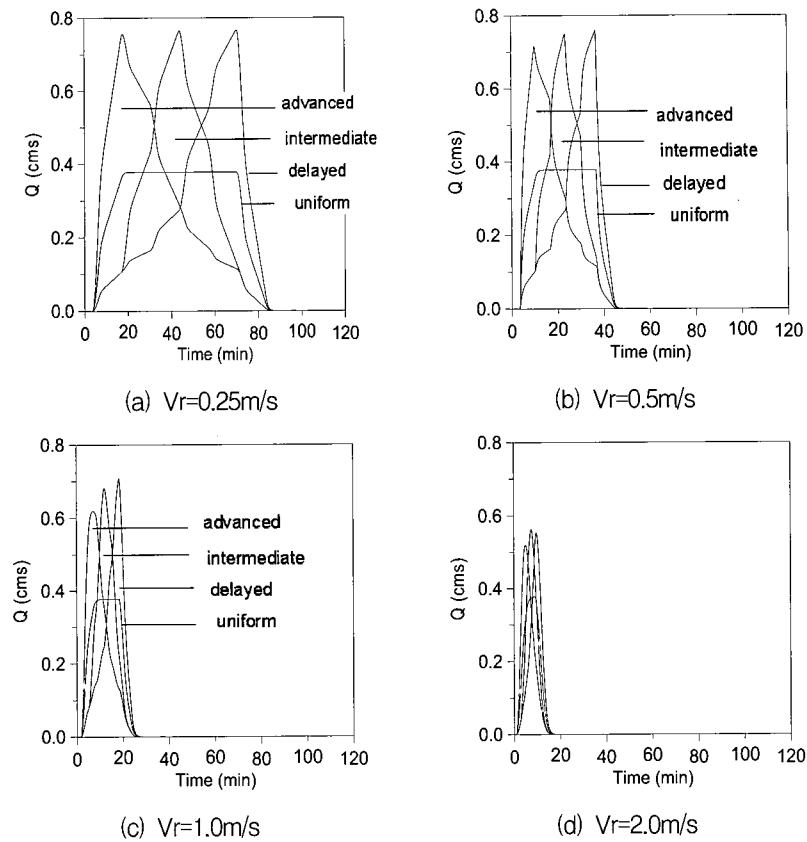


그림 6. 횡방향 이동강우에 대한 수문곡선

표 1. 강우강도와 강우길이가 동일한 경우의 첨두유량

| 강우이동 속도(m/s) | 이동방향 | $Q_p(\text{cms})$ $t_p(\text{min})$ | 강우분포형 | | | | 총유출량 (m^3) |
|--------------|------|----------------------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | | 균등분포형 | 전진형 | 지연형 | 중앙집중형 | |
| $V_r = 0.25$ | 하류방향 | Q_p t_p | 0.377 | 0.6923(91.6%) 32.27 | 0.7304(95.3%) 81.60 | 0.7205(94.3%) 56.27 | 1511.0 |
| | 상류방향 | Q_p t_p | 0.377 | 0.6818(90.3%) 19.47 | 0.7155(93.4%) 67.80 | 0.7074(92.6%) 43.00 | |
| | 횡방향 | Q_p t_p | 0.377 | 0.7554 17.67 | 0.7662 70.27 | 0.7640 43.87 | |
| $V_r = 0.5$ | 하류방향 | Q_p t_p | 0.377 | 0.6135(85.6%) 18.47 | 0.6791(89.4%) 41.57 | 0.6604(88.0%) 29.53 | 755.5 |
| | 상류방향 | Q_p t_p | 0.377 | 0.6061(84.6%) 12.43 | 0.6549(86.3%) 34.50 | 0.6430(85.7%) 23.03 | |
| | 횡방향 | Q_p t_p | 0.377 | 0.7164 10.13 | 0.7593 36.67 | 0.7502 23.37 | |
| $V_r = 1.0$ | 하류방향 | Q_p t_p | 0.372 | 0.5045(81.5%) 11.28 | 0.5852(82.7%) 21.43 | 0.5543(81.4%) 15.83 | 377.8 |
| | 상류방향 | Q_p t_p | 0.370 | 0.4939(79.8%) 7.58 | 0.5500(77.7%) 17.88 | 0.5398(79.2%) 12.95 | |
| | 횡방향 | Q_p t_p | 0.377 | 0.6193 7.25 | 0.7079 18.45 | 0.6812 12.07 | |
| $V_r = 2.0$ | 하류방향 | Q_p t_p | 0.333 | 0.3739(72.0%) 6.37 | 0.4518(81.6%) 11.17 | 0.4136(73.4%) 9.22 | 188.9 |
| | 상류방향 | Q_p t_p | 0.324 | 0.3610(69.5%) 5.05 | 0.4096(73.9%) 9.50 | 0.4040(71.7%) 7.22 | |
| | 횡방향 | Q_p t_p | 0.377 | 0.5194 5.02 | 0.5540 9.72 | 0.5632 7.57 | |

강우가 하류방향으로 이동할 때는 강우이동속도와 지표면유속 및 하도유속의 영향으로 유역출구까지 도달하는데 시간이 소요되므로 유역출구에서 수문곡선 상승시점은 지체되며, 강우이동속도가 빠르면 수문곡선 상승시점이 빨라진다. 반면에 강우가 상류방향으로 이동할 경우의 수문곡선은 지표면 유속과 강우이동속도의 영향을 거의 받지 않으며, 수문곡선 상승시점이 빨라지고 완만한 상승곡선을 이룬다.

그림 2에 나타낸 모의 강우분포형의 크기는 강우의 이동속도에 관계없이 일정한 값으로서, 강우이동속도가 느리면 유역 총강우량은 많아지며 결국 총유출량이 많아지고, 첨두유량이 증가하고, 기저시간이 길어진다. 강우이동속도가 빠를수록 첨두시간이 빨라지며 수문곡선은 급격히 얇아짐을 알 수 있다. 모든 강우이동속도에서 그리고 모든 강우분포형에서 횡방향때의 Q_p 가 가장 크게 나타나며, 상류방향때의 Q_p 가 가장 작게 나타났다. 이와 같은 횡방향의 Q_p 를 기준으로 한 상류방향, 하류방향의 상대적 크기를 ()에 표시하였다.

그림 7은 강우이동속도에 따른 수문곡선을 비교한 것으로서 균등분포형의 경우, 강우이동속도가 빠르면 정상상태에 도달하지 않으며, 하류방향과 상류방향은 강우이동속도가 빠르면 횡방향에 비하여 Q_p 가 급격히 작아진다. 이 경우 총강우량은 강우이동속도에 반비례

하므로 유역의 유출량 Q 는 식 (9)와 같다.

$$Q_2 = Q_1 \frac{V_{r1}}{V_{r2}} \quad (9)$$

4.2 총강우량과 강우길이가 동일한(강우강도가 변하는) 이동강우

유역내 각 점을 통과하는 강우의 길이가 동일하고 강우의 이동속도가 다를 때, 유역내 총강우량이 동일하기 위하여는 강우강도가 변하여야 한다. 즉 강우이동속도에 연관하여 총강우량이 같도록 강우강도를 조절하였으며, 총강우량은 1511m^3 이다. 이 경우 강우이동속도와 무관하게 동일한 총강우량을 유지하기 위한 강우강도 I는 강우이동속도에 비례하여 변하여 식 (10)과 같다.

$$I_2 = I_1 \frac{V_{r2}}{V_{r1}} \quad (10)$$

총강우량과 강우길이를 동일하게 하고, 강우강도를 변화시킨 4가지 강우분포형을 갖는 강우를 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 유역에 종횡단 시켜 유출모의를 하였다. 상류방향, 하류방향 및 횡방향에 대한 수문곡선을 각각 그림 8~10에 나타내었으며, 그때의 첨두유량과 첨두시간을 표 2에 요약하였다.

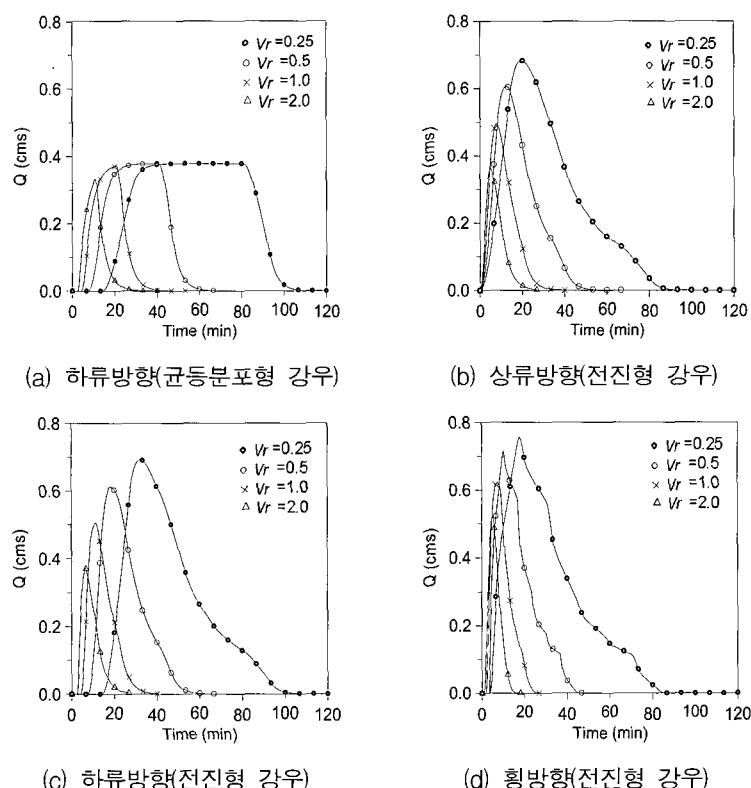


그림 7. 강우이동속도의 변화에 대한 수문곡선 비교

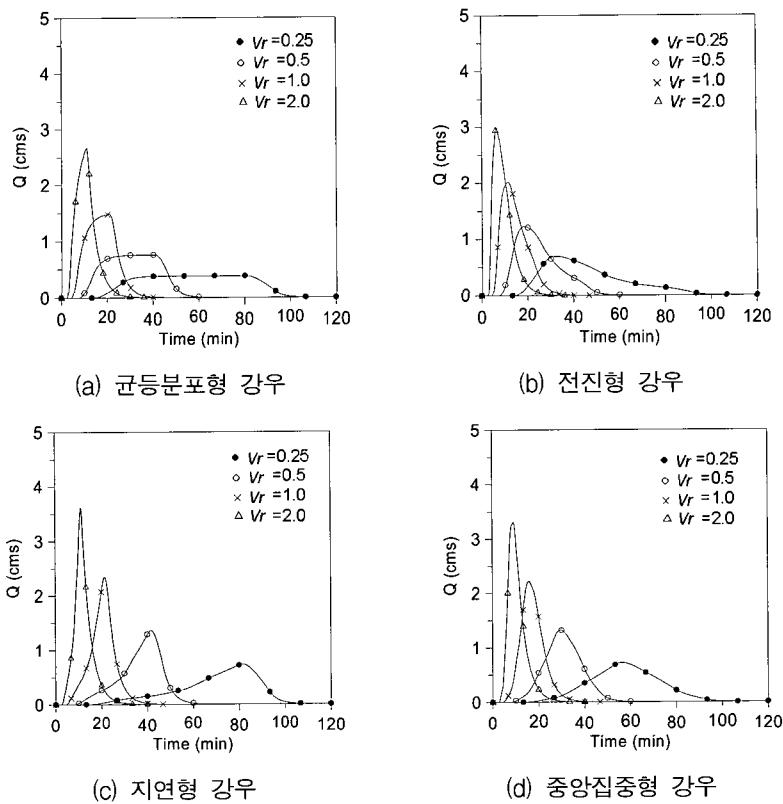


그림 8. 하류방향의 강우분포형별 수문곡선(동일강우량, 동일강우길이의 경우)

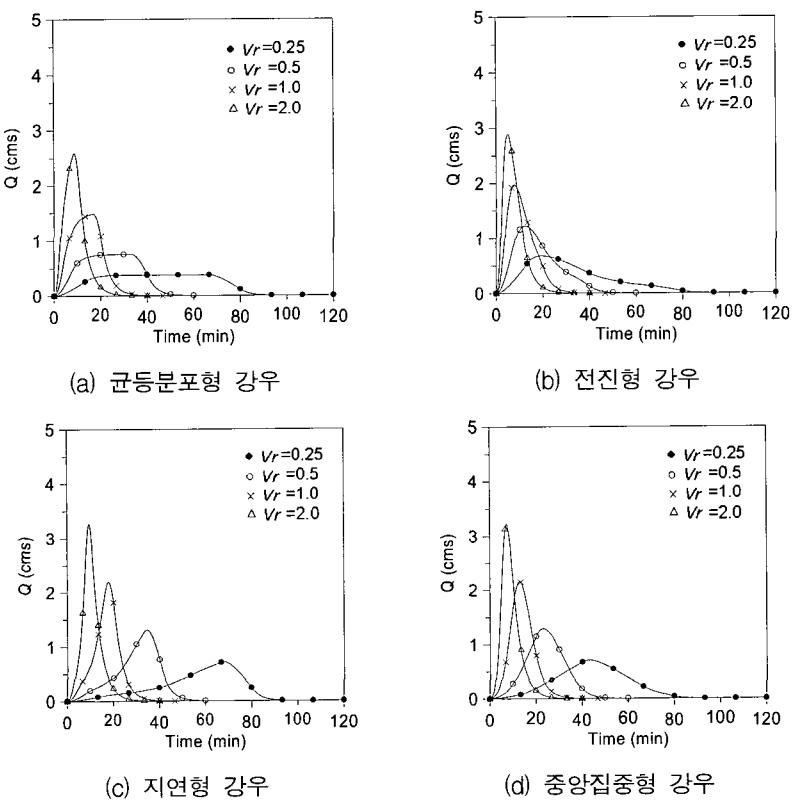


그림 9. 상류방향의 강우분포형별 수문곡선(동일강우량, 동일강우길이의 경우)

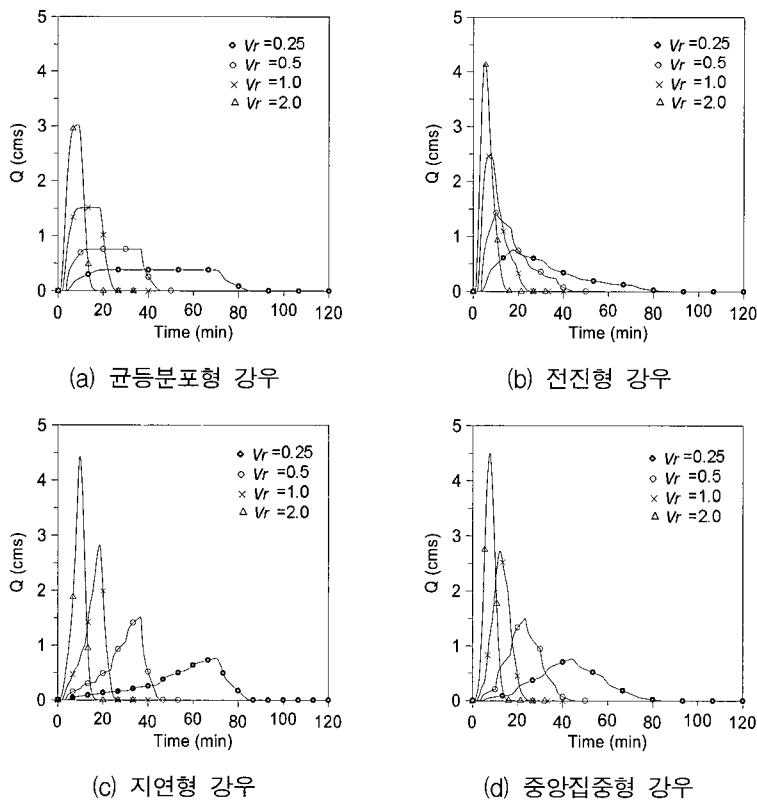


그림 10. 횡방향의 강우분포형별 수문곡선(동일강우량, 동일강우길이의 경우)

표 2. 총강우량과 강우길이가 동일한 경우의 첨두유량

| 이동방향 | 이동속도 (m/s) | Q _p (cms) tp(min) | 강우분포형 | | | | 유출시점 (min) |
|------|---------------|---------------------------------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------|
| | | | 균등분포형 | 전진형 | 자연형 | 중앙집중형 | |
| 하류방향 | 0.25 | Q _p tp | 0.3778 | 0.6923(91.6%) 32.27 | 0.7304(95.3%) 81.60 | 0.7205(94.3%) 56.27 | 13.60 |
| | 0.5 | Q _p tp | 0.7553 | 1.2270(85.6%) 18.47 | 1.3581(89.4%) 41.53 | 1.3208(88.0%) 29.53 | 7.07 |
| | 1.0 | Q _p tp | 1.4869 | 2.0178(81.5%) 11.27 | 2.3408(82.7%) 21.47 | 2.2172(81.4%) 15.87 | 3.87 |
| | 2.0 | Q _p tp | 2.6680 | 2.9909(72.0%) 6.40 | 3.6136(81.5%) 11.20 | 3.3087(73.4%) 9.20 | 2.33 |
| 상류방향 | 0.25 | Q _p tp | 0.3778 | 0.6818(90.2%) 19.47 | 0.7155(93.4%) 67.80 | 0.7074(92.6%) 44.00 | 0.07 |
| | 0.5 | Q _p tp | 0.7551 | 1.2122(84.6%) 12.47 | 1.3098(86.3%) 34.53 | 1.2860(85.7%) 23.00 | 0.07 |
| | 1.0 | Q _p tp | 1.4808 | 1.9758(79.8%) 7.60 | 2.1998(77.7%) 17.87 | 2.1591(79.2%) 12.93 | 0.07 |
| | 2.0 | Q _p tp | 2.5908 | 2.8877(69.5%) 5.07 | 3.2769(73.9%) 9.53 | 3.2320(71.7%) 7.20 | 0.07 |
| 횡방향 | 0.25 | Q _p tp | 0.3778 | 0.7554 17.67 | 0.7662 70.27 | 0.7640 43.87 | 2.53 |
| | 0.5 | Q _p tp | 0.7555 | 1.4329 10.13 | 1.5186 36.67 | 1.5001 23.33 | 3.40 |
| | 1.0 | Q _p tp | 1.5111 | 2.4772 7.27 | 2.8312 18.47 | 2.7248 12.07 | 1.73 |
| | 2.0 | Q _p tp | 3.0188 | 4.1554 5.00 | 4.4314 9.73 | 4.5051 7.60 | 0.87 |

첨두유량, 첨두시간 그리고 수문곡선의 모양은 강우이동속도에 따라 현저하게 다르게 나타났다. 강우분포형에 관계없이 강우이동속도가 빠를수록 총강우량이 동일하게 되기 위하여 강우강도는 커지며, 첨두유량은 더 크게, 더 일찍발생하고 기저시간은 짧아진다. 이것은 상류방향 하류방향, 횡방향 모두 그러하다. 강우이동속도와 강우분포형에 관계없이 횡방향의 경우 Q_p 가 가장 크게 나타났으며, 횡방향의 Q_p 에 대한 상대적 크기를 ()에 표시하였다. 유출시점을 살펴보면 상류방향의 유출이 가장 빨리 나타나며 하

류방향의 유출이 가장 늦게 나타고 횡방향은 그 중간이며, 강우이동속도가 빠를수록 유출이 빨리 나타나서 일찍 끝난다.

그림 11~13은 총강우량과 강우길이가 동일한 경우, 동일한 강우이동속도에 대하여 강우분포형별 수문곡선을 도시하여 강우이동방향과 강우이동속도의 영향을 분석한 것이다. 횡방향의 경우 Q_p 가 가장 크며 상류방향의 경우 Q_p 가 가장 작게 나타나(정상상태의 경우는 동일함) Q_p 는 강우진행방향과 강우이동속도에 강한 영향을 받음을 알수 있다.

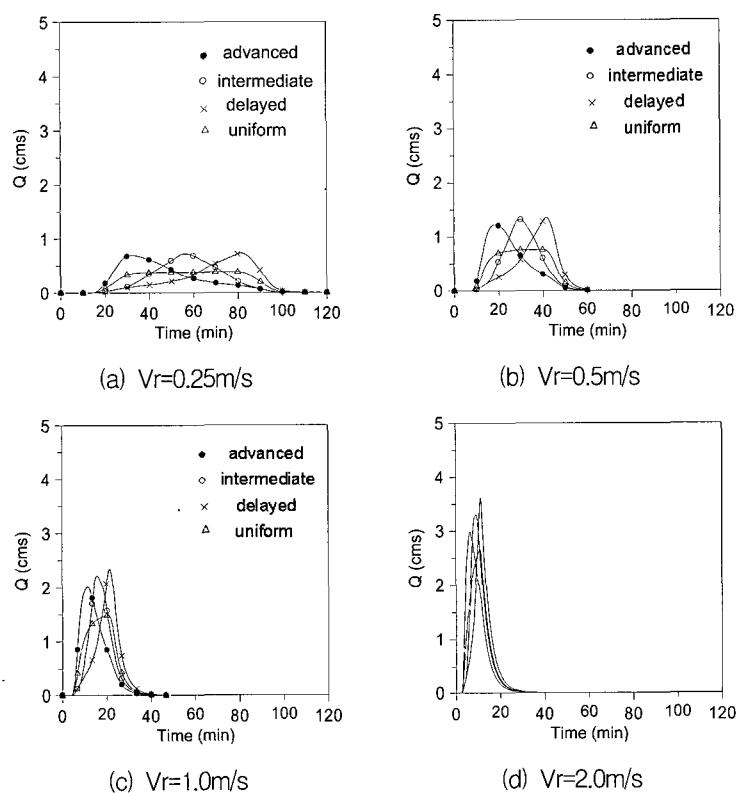
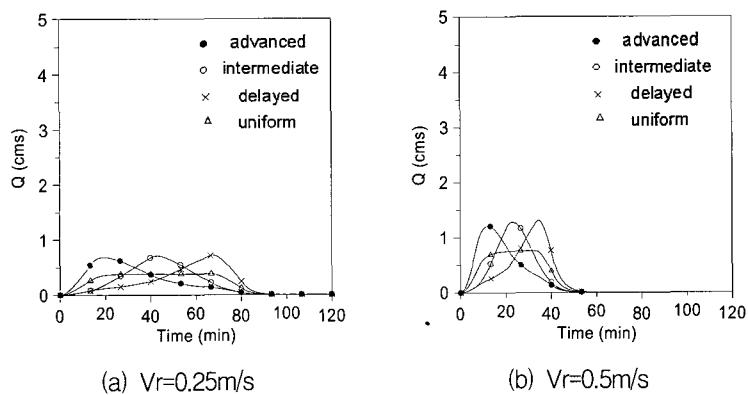


그림 11. 하류방향의 동일한 강우이동속도에 대한 수문곡선(동일강우량, 동일강우길이의 경우)



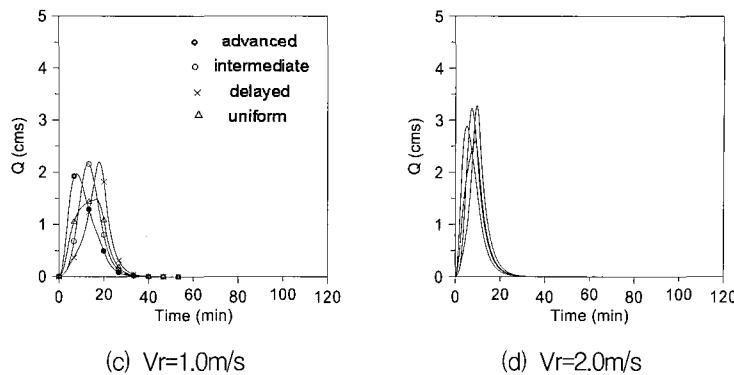


그림 12. 상류방향의 동일한 강우이동속도에 대한 수문곡선(동일강우량, 동일강우길이의 경우)

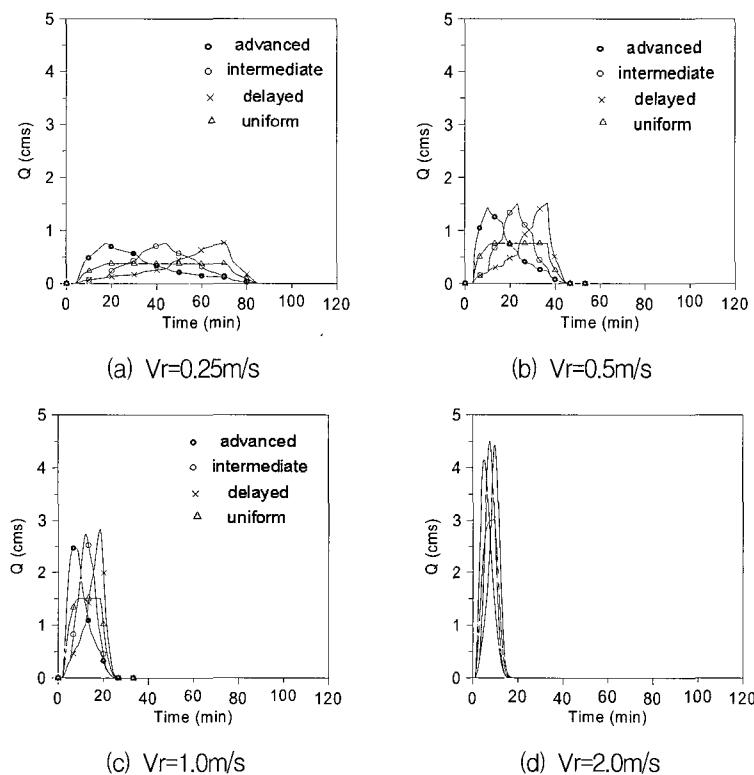


그림 13. 흥방향의 동일한 강우이동속도에 대한 수문곡선(동일강우량, 동일강우길이의 경우)

4.3 총강우량과 강우강도가 동일한(강우길이가 변하는) 이동강우

강우강도가 일정한 경우 강우이동속도에 따르는 총 강우량을 일정하게 유지하기 위하여 강우길이를 변화시켜서 유출추적을 하였다. 이 경우 동일한 총강우량을 유지하기 위하여 강우길이 L_r 는 강우이동속도 V_r 에 비례하여 변하며 식 (11)과 같다.

$$L_{r2} = L_{r1} \frac{V_{r2}}{V_{r1}} \quad (11)$$

그림 14~16은 총강우량이 38mm인 4가지 강우분포형에 대하여 강우이동속도 $V_r=0.25, 0.5, 1.0, 2.0\text{m/s}$ 때의 수문곡선을 비교하였으며, 이때의 첨두유량과 첨두시간을 표 3에 나타내었으며 횡방향의 Q_p 에 대한 상대적 크기를 (%)에 표시하였다. 이 경우에도 횡방향의 Q_p 가 가장 크게 나타났고 상류방향의 Q_p 가 가장 작게 나타났으며 강우이동속도가 빠를수록 횡방향의 Q_p 값에 대한 차이가 점차 작아지고 있다. 하류방향과 상류방향의 경우 강우이동속도가 빠를수록 Q_p 는 점차 커지며, 다만 균등분포강우의 경우 상.하류방향, 횡방향 모두 같은 크기를 갖는 정상상태를 나타내고 있다.

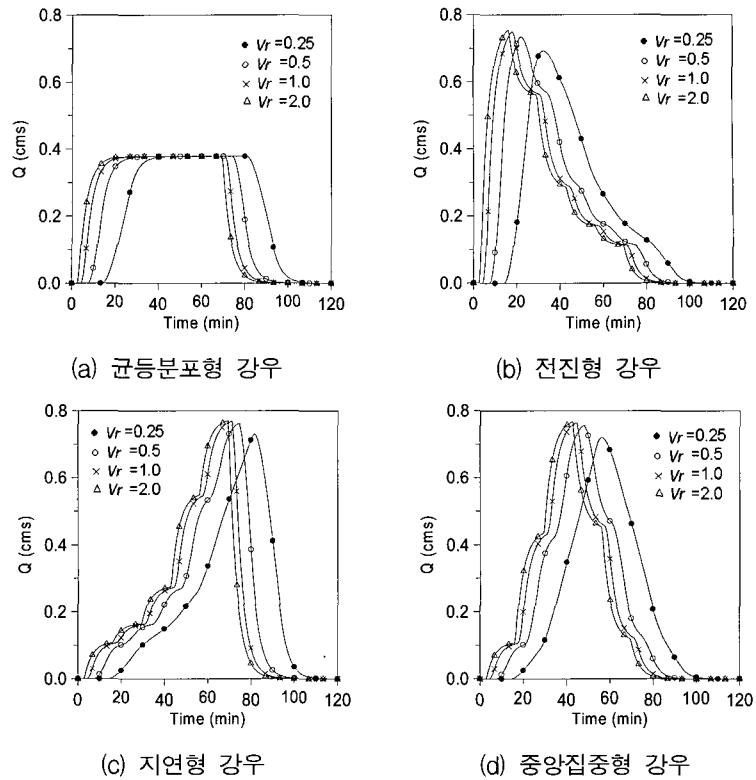


그림 14. 하류방향의 강우분포별 수문곡선(동일강우량, 동일강우강도의 경우)

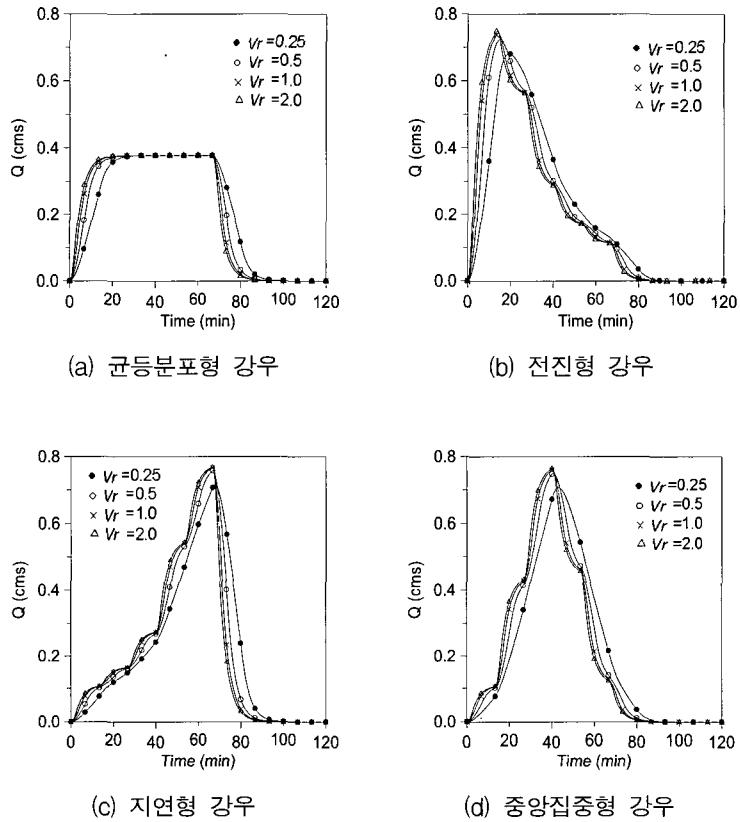


그림 15. 상류방향의 강우분포별 수문곡선(동일강우량, 동일강우강도의 경우)

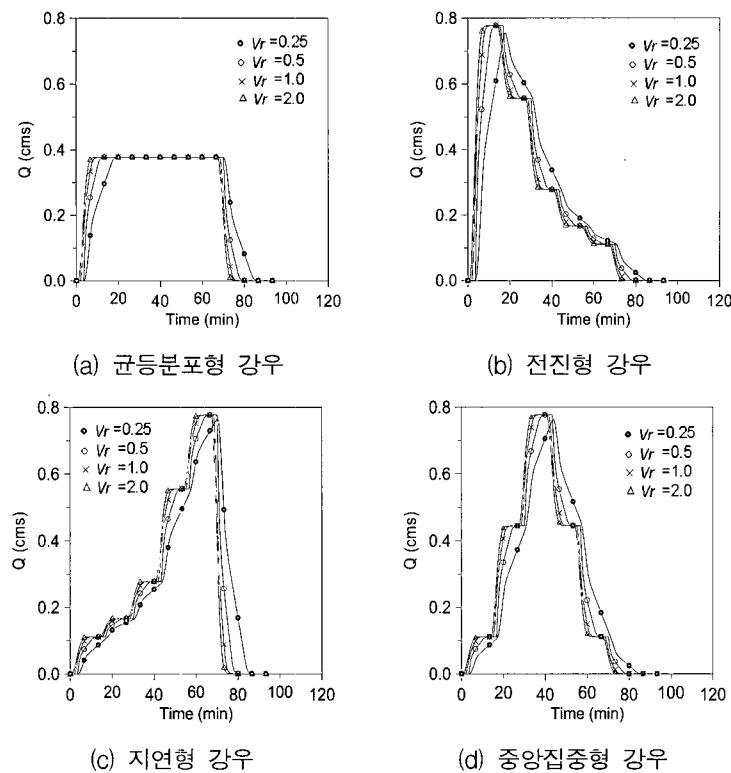


그림 16. 횡방향의 강우분포별 수문곡선(동일강우량, 동일강우강도의 경우)

표 3. 총강우량과 강우강도가 동일한 경우의 첨두유량

| 이동방향 | 이동속도 (m/s) | Q _p (cms) tp(min) | 강우분포형 | | | |
|------|---------------|---------------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | 균등분포형 | 전진형 | 지연형 | 중앙집중형 |
| 하류방향 | 0.25 | Q _p tp | 0.377 | 0.6923(91.6%) 32.27 | 0.7304(95.3%) 81.60 | 0.7205(94.3%) 56.27 |
| | 0.5 | Q _p tp | 0.377 | 0.7340(94.4%) 21.93 | 0.7625(98.0%) 74.20 | 0.7562(97.2%) 47.87 |
| | 1.0 | Q _p tp | 0.377 | 0.7488(96.3%) 17.80 | 0.7687(98.8%) 70.80 | 0.7645(98.3%) 44.27 |
| | 2.0 | Q _p tp | 0.377 | 0.7541(97.0%) 15.93 | 0.7706(99.1%) 69.07 | 0.7672(98.6%) 42.47 |
| 상류방향 | 0.25 | Q _p tp | 0.377 | 0.6818(90.3%) 19.47 | 0.7155(93.4%) 67.80 | 0.7074(92.6%) 44.00 |
| | 0.5 | Q _p tp | 0.377 | 0.7248(93.2%) 15.13 | 0.7582(97.5%) 66.87 | 0.7502(96.5%) 40.60 |
| | 1.0 | Q _p tp | 0.377 | 0.7422(95.4%) 14.00 | 0.7664(98.5%) 66.73 | 0.7611(97.9%) 40.20 |
| | 2.0 | Q _p tp | 0.377 | 0.7489(96.3%) 13.67 | 0.7689(98.9%) 66.67 | 0.7647(98.3%) 40.07 |
| 횡방향 | 0.25 | Q _p tp | 0.377 | 0.7554 --- | 0.7662 --- | 0.7640 --- |
| | 0.5 | Q _p tp | 0.377 | 0.7778 --- | 0.7778 --- | 0.7778 --- |
| | 1.0 | Q _p tp | 0.377 | 0.7778 --- | 0.7778 --- | 0.7778 --- |
| | 2.0 | Q _p tp | 0.377 | 0.7778 --- | 0.7778 --- | 0.7778 --- |

5. 결 론

본 연구에서는 시간적, 공간적으로 분포하는 강우에 대하여 단순화한 모형유역에서 임의속도로 강우를 상류방향, 하류방향, 횡방향으로 이동시키므로서 유출해석을 하였다. 이때 이동강우에 대한 수문학적 응답을 평가하기 위하여 공간적 길이를 갖는 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형의 4가지 강우분포형을 적용하였으며, 운동파방적식을 사용하여 수치해석하였다.

유출수문곡선의 모양과 첨두유량은 강우분포형에 강한 영향을 받음을 알 수 있으며, 또한 이것은 강우이동방향과 강우이동속도에도 영향을 받음을 알 수 있다. 강우이동속도가 느릴수록 첨두유량이 커지고 기저시간이 길어지며, 강우이동속도가 빠를수록 첨두시간이 빨라지고 유출이 일찍 시작하여 빨리 끝난다. 강우이동방향에 대하여 상류방향으로 이동할때는 수문곡선 상승시점이 빨라지고 상승곡선이 완만하게 된다. 횡방향의 경우에 첨두유량이 가장 크게 나타나고 상류방향의 경우에 첨두유량이 가장 작게 나타났다. 강우분포형의 경우는 균등분포형에서 첨두유량이 가장 작게 나타나고 지연형에서 대체로 첨두유량이 가장 크게 나타났으며, 강우분포형에 대한 유출의 민감도는 강우이동속도가 빠를수록 감소함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 한국과학기술시회 평가원에서 위탁시행한 2004년도 특정연구개발사업중 “웹기반 홍수정보시스템 Prototype 개발사업”(과제번호 : M1-0402-02-0002-04-002-02-000-00)에 의한 연구로서 관계당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 최계운, 이희승, 안상진 (1992). “분포형 모델을 이용한 유역내 이동강우의 유출해석.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제25권 제1호, pp. 101-109.
- 최계운, 강희경, 박용섭 (2000). “GIS를 활용한 유역내 이동강우에 의한 유출특성 연구.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제33권 제6호, pp. 793-804.

- de Lima, JLMP, 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.
- Maksimov, V. A. (1964). "Computing runoff produced by a heavy rainstorm with a moving center." *Sov Hydrol.*, 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., Wheater, H. S. (1985). "Hydrograph sensitivity to storm kinematics." *Water Resour. Resear.*, 21, pp. 337-345.
- Ogden, F. L., Richardson, J. R., Julien, P. Y. (1995). "Similarity in catchment response, 2. Moving rainstorms." *Water Resour. Resear.*, Vol. 31(6), pp. 1543-1547.
- Roberts, M. C., Klingeman, P. C. (1970). "The influence of landform and orcpitation parameters and flood hydrographs." *J. of Hydrol.*, 11, pp. 393-411.
- Singh, V. P. (1996). *Kinematic wave modelling in water resources; surfacewater hydrology*. Chichester, John Wiley and Sons Ltd.
- Singh, V. P. (1998). "Effect of the direction of storm movement on planar flow." *Hydrol. Prosess.*, 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. Precess.*, 16, pp. 3437-3466.
- Singh, V. P. (2002b). "The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow." *Advances in Water Resources*, 25, pp. 817-828.
- Surkan, A. J. (1974). "Simulation of storm velocity effects of flow distributed channel network." *Water Resour. Resear.*, 10(6), pp. 1149-1160.

(논문번호:04-48/접수:2004.05.04/심사완료:2004.09.04)