

# 유역형상에 따르는 이동강우의 유출영향분석 (I)

## - 대칭유역형상 -

### Runoff Analysis due to Moving Storms based on the Basin Shapes (I) - for the Symmetric Basin Shape -

한건연\* · 전민우\*\* · 김지성\*\*\*

Han, Kun Yeun · Jeon, Min Woo · Kim, Ji Sung

#### Abstract

Using kinematic wave equation, the influence of moving storms to runoff was analysed with a focus on watersheds. Watershed shapes used are the oblong, square and elongated shape, and the distribution types of moving storms used are uniform, advanced and intermediate type. The runoff hydrographs according to the rainfall distribution types were simulated and the characteristics were explored for the storms moving down, up and cross the watershed with various velocity. The shape, peak time and peak runoff of a runoff hydrograph are significantly influenced by spatial and temporal variability in rainfall and watershed shapes. A rain storm moving in the cross direction of channel flow produces a higher peak runoff than in the downstream direction and upstream direction. A peak runoff from a storm moving downstream exceeds that from a storm moving upstream. For storms moving downstream peak time was more delayed than for other storm direction in the case of elongated watershed. The runoff volume and time base of the hydrograph decreased with the increasing storm speed.

**Keywords :** moving storm, moving velocity, moving direction, rainfall distribution type, basin shape

#### 요 지

유역형상의 변화에 따라서 이동강우가 유출에 미치는 영향을 운동파이론을 적용하여 분석하였으며, 유역형상은 신장형유역과 정사각형유역 및 장방형유역에 대하여 분석하였고, 이동강우 분포형은 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형을 사용하였다. 이와 같은 형상의 유역에 대하여 다양한 이동속도를 가진 강우가 유역내 하천의 상류방향, 하류방향, 횡방향으로 이동할 때 강우분포형에 따르는 유출수문곡선을 모의하여 그 특성을 비교분석하였다. 유출수문곡선의 모양과 침투시간, 침투유량은 시간적, 공간적으로 변화하는 강우와 유역형상에 의하여 크게 영향을 받는다. 횡방향의 이동강우에서는 상류방향과 하류방향의 경우보다 더 큰 침투유량이 발생하며, 하류방향 이동강우의 침투유량은 상류방향의 침투유량보다 더 크게 나타났다. 신장형유역의 경우 하류방향 이동강우의 침투시간은 상류방향과 횡방향의 경우보다 더 지체되며, 수문곡선의 총유출량과 기저시간은 강우속도가 증가함에 따라 감소하였다.

**핵심용어 :** 이동강우, 이동속도, 이동방향, 강우분포형, 유역형상

#### 1. 서 론

유출수문곡선에 영향을 미치는 인자는 크게 유역특성과 강우특성으로 대별할 수 있으며, 유역특성은 유역면적, 유역형상, 유역경사, 식생, 조도, 토지이용 등 이며 강우특성은 강우량, 강우강도, 강우지속시간, 강우이동속도, 강우이동방향 등을 들 수 있다. 이와 같은 유역특성중에서 유역형상이 장방형(좌우로 긴 유역), 신장형(상하로 긴 유역)에 따라 유출특성이 다르게 되며, 강우특성중에서 강우이동속도와 이동방향이 유출에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 알려져 있다. 강

우이동방향은 하도의 흐름방향을 기준으로하여 하류방향, 상류방향, 횡방향으로 구별할 수 있다. 이동강우에 대한 지표면 유출은 입력의 시간과 공간적 분포에 관한 정상강우와는 달리 비선형과정이며, 강우의 이동성을 무시하면 침투유량의 심각한 과소평가 또는 과대평가를 초래하게 된다(Singh, 1998). 이동강우에 대한 수문학적 응답은 이동강우의 방향, 길이, 속도, 양상(pattern)에 종속적이며, 이에 대한 해석을 하므로써 유출수문곡선의 형상을 예측하는데 도움이 될 것이다.

Maksimov(1964)에 의하여 처음 이루어진 이동강우에 대한

\*정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수(E-mail: kshanj@knu.ac.kr)  
\*\*정회원 · 충북대학교 토목공학과 교수(E-mail: minwoo@chungbuk.ac.kr)  
\*\*\*정회원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: jisungk@gmail.com)

연구는 최근 이동강우의 방향과 속도가 토양유실에 크게 영향을 주며, 토양유실은 상류방향보다 하류방향 이동강우에 의하여 더 크게 발생한다는 것이 입증되었다(Lima 등, 2003). 이동강우에 대한 연구는 Lima 등(1999, 2003)과 Singh(1996, 1997, 1998, 2022a, 2002b)에 의하여 많은 연구가 이루어 졌으며, Richardson(1989)은 1차원 유한요소법을 이용하여 이동강우의 지표면 유출영향을 분석하였다. Ogden 등(1995)은 강우이동속도와 강우길이를 무차원해석을 하므로써 상류방향의 침투유량이 하류방향의 침투유량보다 더 작게 나타남을 입증하였다. Tabios 등(1998)은 유역모양과 크기가 유출에 미치는 영향에 관련하여, 이동강우의 영향을 확률론적으로 분석하였으며, 지표면과 하도추적에 대하여 운동과모형을 사용하였다. 최근 Lima 등(2003)은 이동강우가 지표면유출에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였으며, 국내 연구로서는 최계운 등(1992), 최계운 등(2000), 한건연 등(2004)을 들 수 있다.

지금까지 이동강우에 관한 대부분의 연구는 지표면에서 상류, 하류로 이동하는 강우에 의한 유출영향을 분석한 것이었으며, 유역의 형상과 횡방향의 이동강우에 대하여는 다루지 못하였다. 한건연 등(2004)의 연구는 정사각형유역만을 다루었으나 본 연구에서는 유역형상에 따르는 유출특성을 구명하고자 한다. 이를 위하여 유역을 지표면과 하도로 구성하였으며, 그 형상과 특성을 단순화하여 2개의 직사각형 지표면과 그 지표면 사이에 있는 하천으로 이루어진 유역을 가정하고, 설정된 강우분포형을 갖는 이동강우가 유출수문곡선에 미치는 영향을 분석하였다. 유역형상은 신장형유역과 장방형유역 그리고 정사각형유역에 대하여 분석하였으며, 이동강우 분포형은 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형을 사용하였다. 이와 같은 형상의 유역에 대하여 다양한 이동속도를 가진 강우가 유역내 하천의 상류방향, 하류방향, 횡방향으로 이동할 때 강우분포형에 따르는 유출수문곡선을 모의하여 그 특성을 비교분석하였고, 이때 지배방정식으로서 운동과이론을 적용하였다.

## 2. 지배방정식 및 수치해법

부정부등류인 홍수류의 지배방정식으로서 Saint-Venant 방정식을 간략화하여 해석적 해를 구하는 대표적인 방법이 운동과모형이다. Saint-Venant 방정식의 하나인 운동량방정식은 관성력, 압력, 중력, 마찰력 그리고 측방류의 운동량변화에 의하여 지배된다. 운동과모형은 운동량방정식에서 관성과 압력항이 마찰력 및 중력항에 비해 무시될 수 있다고 보고 해를 구하는 방법이다. 따라서 운동과이론은 운동량방정식에서 하상경사와 마찰경사만을 고려하므로 방정식이 간단하며 이에 따른 해석방법도 매우 간편하다.

강우로 인한 지표면유출은 하천으로의 측방향유입이 되며, 개수로 흐름문제에서 비정상흐름으로 간주될 수 있다. 1차원 비정상 개수로흐름의 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된 보존식형태의 Saint-Venant 방정식을 사용하며, 측방향유입이 있는 지표면 흐름에 대한 연속방정식과 운동량방정식은 각각 식 (1), (2)와 같다.

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

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

여기서  $t$ =시간(sec),  $x$ =지표면 흐름방향으로의 거리(m),  $q$ =단위폭당 유량( $m^2/s$ ),  $h$ =지표면 수심(m),  $l$ =측방향유입량으로서 지표면흐름의 경우 공간적, 시간적으로 변화하는 유효강우( $m/s$ )이며, 이때 지표류를 Manning법칙을 따르는 흐름으로 가정하면  $\alpha = \sqrt{S_f}/N_p$  ( $N_p$ =지표면의 흐름저항을 나타내는 조도계수,  $S_f$ =마찰경사),  $\beta=5/3$ 가 된다.

식 (1)의 연속방정식과 식 (2)의 운동량방정식이 지표면흐름의 지배방정식이 된다. 식 (2)를 시간  $t$ 에 대해 편미분하여 식 (1)에 대입하면 운동과방정식 (3)을 얻을 수 있으며, 이때  $V_p$ 는 지표면흐름의 평균유속이다.

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

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

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

$$Q = aA^b \quad (5)$$

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

식 (4)의 연속방정식과 식 (5)의 운동량방정식이 하도흐름의 지배방정식이 된다. 식 (5)를 시간  $t$ 에 대해 편미분하여 식 (4)에 대입하면 운동과방정식 (6)을 얻을 수 있으며, 이때  $V_c$ 는 하도흐름의 평균유속이다.

$$\frac{\partial Q}{\partial y}(bV_c) + \frac{\partial Q}{\partial t} = q_l bV_c \quad (6)$$

식 (3)과 (6)은 시간과 공간적으로 유량의 변화를 나타내는 비선형 1차원 편미분방정식이지만, 비선형성이 우세하지 않기 때문에 선형론에 의하여 해석할 수 있다. 유한차분법을 이용하여 운동과방정식을 수치해석하는 방법에는 여러가지가 알려져 있으나, 2차精度보다 안정성이 있는 1차精度 수치해법을 사용하여 식 (3)과 식 (6)을 차분화 시키면 지표면흐름과 하도흐름에 대하여 각각 식 (7), (8)과 같다.

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

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

여기서 Courant수  $C$ 는 지표면흐름의 경우  $C_p = \beta V_p \Delta t / \Delta x$ 이며, 하도흐름에서는  $C_c = b V_c \Delta t / \Delta y$ 이다. 이때 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. 유역형상 및 이동강우강도 분포형

자연하천유역은 그 모양이 다양하지만, 해석의 어려움을 피하고 유역의 유출현상을 수리화적으로 해석하기 위하여는 단순화한 모형유역에 대하여 해석하는 것이 편리하다. 자연하천유역에서 흔히 접할수 있는 3가지 유역형상은 신장형(elongated shape)유역, 정사각형(square shape)유역, 장방형(oblong shape)유역으로서, 신장형유역은 유역형상계수  $F(=W/Z^2)<1$ , 정사각형유역은  $F=1$ 이고 장방형유역은  $F>1$ 이다. 여기서  $W$ =유역면적,  $Z$ =본류의 유로연장이다. 본 연구에서는 동일한 유역면적 40000 m<sup>2</sup>로서 신장형유역(폭80m×길이 500 m,  $F=0.16$ ), 정사각형유역(폭200m×길이200 m,  $F=1$ ), 장방형유역(폭500m×길이 80 m,  $F=6.25$ )의 3가지 모형유역을 설정하였다. 일반적으로 장방형유역은 정사각형유역에 비하여 침투시간이 짧고 침투유량이 커지는 반면에 신장형유역은 이와 반대의 현상이 일어난다.

이와 같이 설정된 3가지 형상의 모형유역에 대하여 시불변의 강우가 유역을 일정한 속도로 중·횡단이동하는 경우, 이로 인한 유출의 영향을 분석하고자 하며, 종단의 경우는 하도흐름의 동일방향과 역방향 이동강우에 대하여 유출을 구하였다. 이동강우로 인한 유출의 영향은 유역의 물리적 특성에 따라 변하겠으나 본 연구에서는 강우강도의 공간적 분포형태와 강우의 진행방향과 이동속도 그리고 유역형상의 다양성에 주안점을 두었으며, 지표면과 하도의 형상 그리고 유역의 형상을 단순화하여 그림 1에 나타내었다. 2개의 직사각형 지표면으로 이루어진 유역을 가정하고, 이 유역으로부터의 유출은 지표면사이에 있는 하천으로 측방향유입되어 유역출구로 유출된다. 지표면에서의 평균유속은 0.3 m/s, 하천의 평균유속은 1.2 m/s라 가정하였다.

일반적으로 강우는 시간적으로 뿐만아니라 공간적으로 다양하게 변화하여 유출수문곡선에 영향을 미친다. 동일한 총강우량이라 할지라도 강우의 공간적 분포형에 따라 수문곡선이 달라지며, 시간적으로 변화하는 강우주상도의 경우 대체로 중앙집중형이 가장 큰 침투유량을 주는 것으로 알려져 있다.

강우의 시간적 변화는 강우주상도에 의하여 표현되지만, 일정한 길이를 가진 강우가 공간상에서 이동하는 경우, 강우의 이동속도에 의하여 지표면유출에 기여하는 강우의 시간적 분포를 내포하게 된다. 본 연구에서는 시간적으로 일정한 분포

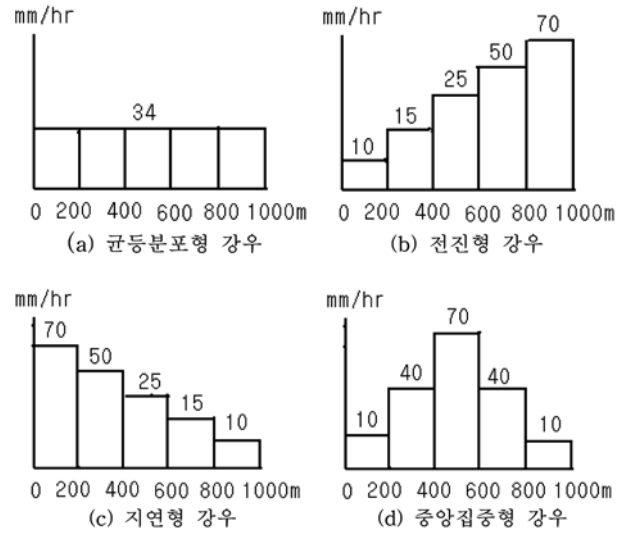


그림 2. 이동강우강도의 공간적 분포형

형을 가진 강우가 설정된 모형유역을 이동하는 경우, 유출에 미치는 영향을 분석하였으며, 간편성을 위하여 손실강우는 고려하지 않았다. 강우의 공간적 분포형을 균등분포형(uniform type), 전진형(advanced type), 지연형(delayed type), 중앙집중형(centered type)으로 설정하여 그림 2에 나타내었으며, 모든 경우 총강우량은 170 mm/hr, 강우의 길이는 1000 m이다.

이동강우에 의한 유출을 모의하기 위하여 x방향에 대하여,  $\Delta x$ , y방향에 대하여  $\Delta y$ 로 이산화한 유역을  $\Delta t$ 시간 간격으로 강우를 이동시키므로서 유출추적을 하였으며, 강우의 이동속도는 횡방향의 경우  $\Delta x/\Delta t$ , 종방향의 경우  $\Delta y/\Delta t$ 로 나타내었다. Singh(1997)에 의하면 강우이동속도는 7~35 km/hr까지 관측된 바 있으며, Marshall(1980)에 의하면 219개의 강우중에서 0~8.3 m/s가 26%, 8.3~16.7 m/s가 60%, 16.7 m/s 이상이 14%를 차지하고 있다. 본 연구에서는 모형유역의 크기를 고려하여 이동속도범위  $V_r=0.25\sim 2.0$  m/s(0.25 m/s, 0.5 m/s, 1.0 m/s, 2.0 m/s)를 사용하였다. 하류방향의 경우, 최상류지표면에 내린 강우는 하도흐름을 이루어 차례로 유역출구에서 유출로 나타나며, 상류방향의 경우는 하류방향의 경우와는 반대로 유역출구에 있는 지표면에서부터 유출이 시작되므로 역방향으로 유출을 계산한다. 반면에 횡방향의 경우는 지표면과 하도가 만나는 점까지는 강우이동방향과 지표면흐름이 같은 방향이 되지만 그 이후는 강우이동방향과 반대방향으로 지표면유출이 발생한다.

### 4. 적용 및 분석

주어진 강우강도와 강우길이의 강우가 모형유역을 이동하며, 강우이동속도에 따라 유역내 총강우량이 달라진다. 단위면적의 유역에 대하여 강우이동속도가 0.25 m/s이면 각각의 강우는 4000초동안 단위유역에 기여하여 총유출량 1511 m<sup>3</sup>이 되며, 강우이동속도가 2 m/s인 경우는 500초동안 기여하여 총유출량 188.9 m<sup>3</sup>이 된다.

공간분포하는 이동강우의 영향을 분석하기 위하여 그림 2

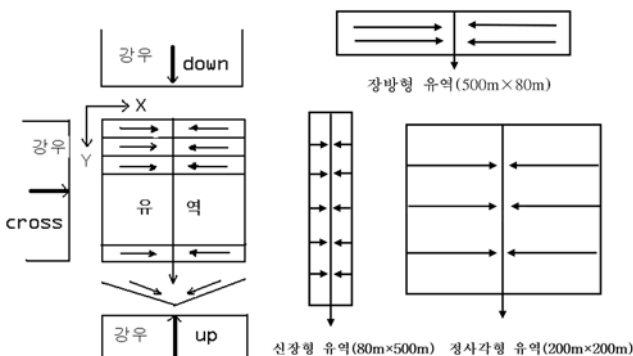


그림 1. 강우이동방향과 유역형상

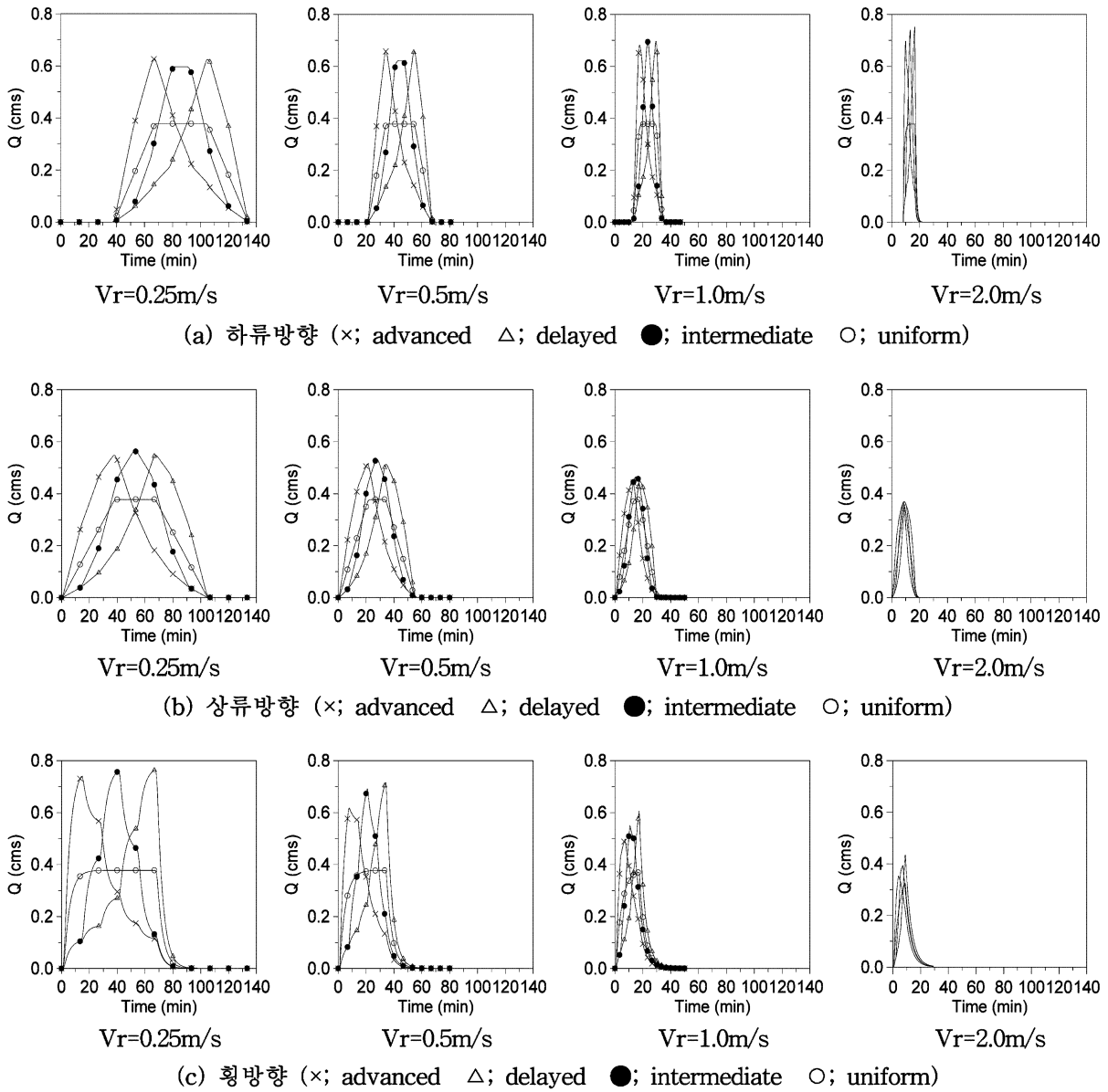


그림 3. 신장형 유역

의 4가지 강우분포형의 이동강우를 3가지 형상을 갖는 모형 유역에 중.횡단 이동시키므로서 유출모의를 하였다. 그 결과를 강우이동속도  $V_r=0.25, 0.5, 1.0, 2.0$  m/s 그리고 신장형 유역, 정사각형유역, 장방형유역에 대하여 그림 3~5에 나타내었으며, 이에 대한 첨두유량  $Q_p$ 와 첨두시간  $T_p$ 의 분석결과를 표 1에 나타내었다. ■표시는 유역형상별로 가장 큰 첨두유량을 나타내는 강우분포형을 표시한 것이며, ▣표시는 강우 이동방향별로 가장 큰 첨두유량을 나타내는 유역형상을 표시한 것이다. ( ) 내의 값은 첨두시간을 나타내며, 이동강우의 유역형상별 특성에 대한 보다 더 일관성있는 추세를 얻기 위하여 속도 0.1 m/s와 1.5 m/s를 추가하였다.

표 2는 강우이동방향별로 가장 큰 첨두유량을 보여주는 유역형상을 분석한 것이다. 유역형상별 첨두유량을 비교해 보면 하류방향에서 강우이동속도가 느릴때는 정사각형의  $Q_p$ 가 가장 크며, 점차 이동속도가 빨라지면 신장형의  $Q_p$ 가 가장 커진다. 상류방향의 경우 속도가 느릴 때는 장방형의  $Q_p$ 가 크다가 속도가 빨라지면 정사각형의  $Q_p$ 가 가장 커진다. 횡방향에서는 속도가 느릴때는 정사각형, 빨라지면 장방형으로

변해가고 있으며, 이것은 전진형, 지연형, 중앙집중형강우에서 모두 공통된 성질을 보여준다.

모든 강우분포형에서 그리고 모든 유역형상에서 이동속도가 빠를수록  $Q_p$ 는 점차 작아지고 기저시간은 짧아지고 있으나, 신장형의 하류방향에서 만든 속도가 빠를수록  $Q_p$ 가 다소 커지고 있음을 그림에서 확인할수 있으며, 그 이유는 하류방향에서는 유역출구에서의 유출량이 강우이동속도와 도달시간에 종속적이기 때문이라 생각된다. 강우분포형은 시간에 대하여 불변이므로 이동속도가 빨라지면 유속에 무관하게 유출량은 감소하고, 첨두유량은 작아지고, 기저시간은 짧아진다.

표 3은 유역형상에 따라서 어느 강우분포형이 가장 큰  $Q_p$ 를 나타내는 가를 보여준 것이며, 장방형에서는 강우이동방향에 관계없이 지연형의  $Q_p$ 가 가장 크게 나타났다. 신장형의 경우 상류방향은 중앙집중형 그리고 횡방향은 지연형의  $Q_p$ 가 가장 크고, 하류방향은 강우이동속도에 따라 전진형 또는 지연형이 가장 큰  $Q_p$ 를 보여준다. 정사각형에서는 대체로 지연형의  $Q_p$ 가 가장 큰 값이지만 상류방향에서 이동

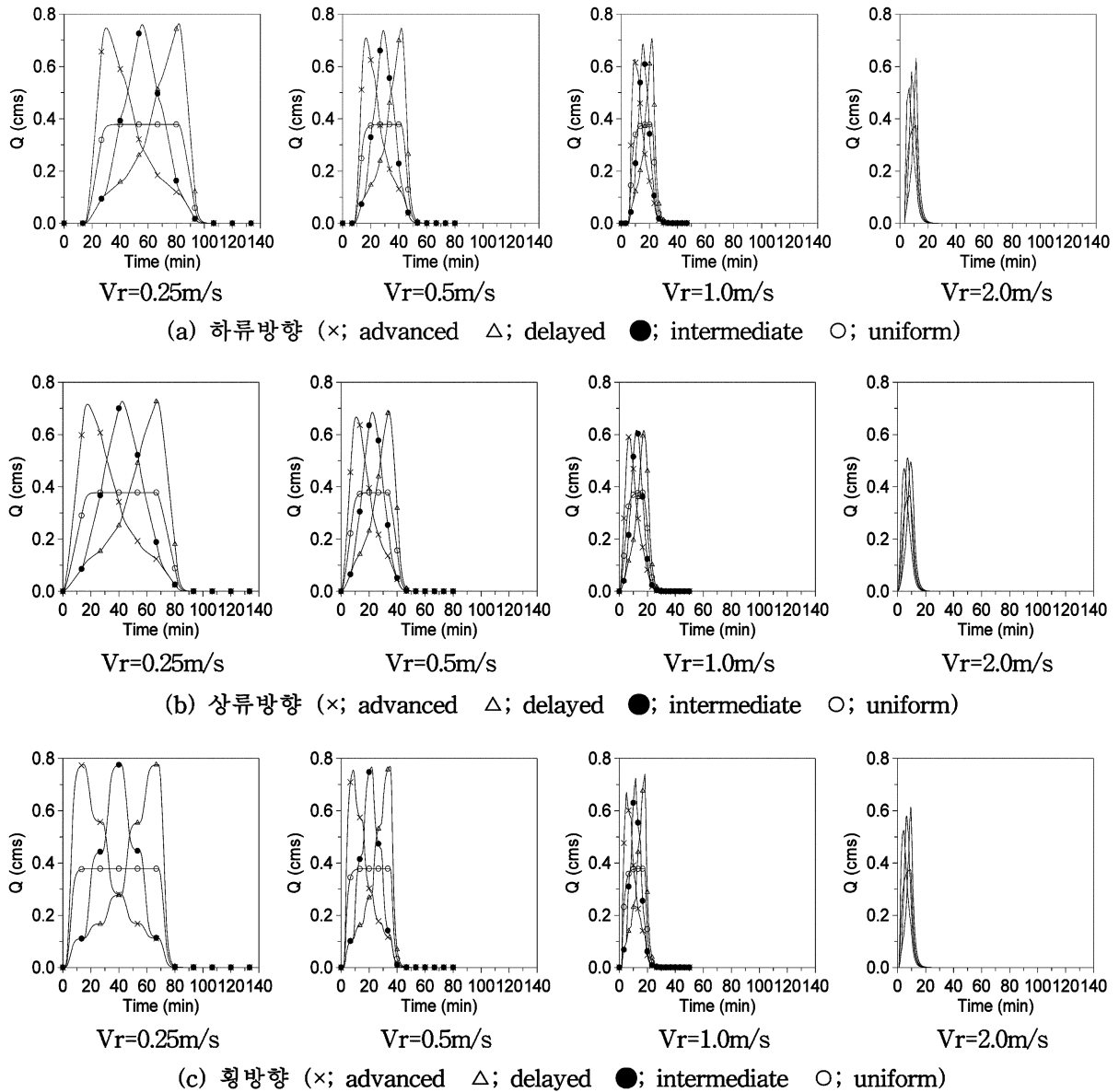


그림 4. 정사각형 유역

속도에 따라 지연형 또는 중앙집중형이 가장 큰  $Q_p$ 를 보여 준다.

표 4는 강우이동속도가 변화함에 따라서 가장 큰 침투유량을 나타내는 강우이동방향을 보여주는 것이다. 신장형에서는 이동속도가 느리면 횡방향  $Q_p$ 가 가장 크다가 속도가 빠르면 하류방향의  $Q_p$ 가 가장 커진다. 이것은 신장형에서 강우이동속도가 느릴때는 횡방향의 이동강우로 인한 도달시간이 하류방향의 경우보다 짧아져서  $Q_p$ 가 커진다고 생각된다. 정사각형과 장방형에서는 대체로 횡방향의  $Q_p$ 가 가장 큰 값을 갖으며, 하류방향과 상류방향만을 비교하면 모든 경우에서 하류방향의  $Q_p$ 가 상류방향의  $Q_p$ 보다 크게 나타났다.

그림 6은 강우이동속도에 대한 침투시간을 표시한 그림이며, 침투시간은 이동속도가 증가함에 따라 지수적으로 급격히 짧아져서 일정한 값에 수렴함을 알 수 있으며, 지연형에서 침투시간이 가장 길고 전진형에서 가장 짧다. 이러한 현상은 강우의 중심이 지연형에서 가장 길고 전진형에서 가장 짧기 때문으로 생각된다. 신장형의 경우 다른 유역형상에 비하여 도달거리가 가장 길기 때문에 하류방향에서 침투시간  $T_p$ 가

매우 길게 나타나고, 정사각형과 장방형의 경우 이동속도가 빨라 질수록  $T_p$ 가 거의 같은 시각에서 발생하였다.

그림 7은 강우이동속도에 따르는 침투유량의 변화를 보여 준 것이며, 장방형에서는 상류방향, 하류방향  $Q_p$ 의 큰 변화가 없으며, 이동속도가 증가함에 따라  $Q_p$ 가 급격히 감소하였다. 정사각형에서는 이동방향에 따라  $Q_p$ 의 큰 변화가 없는 반면에 신장형에서는 상류방향과 횡방향의  $Q_p$ 가 급격히 감소하고, 하류방향의  $Q_p$ 가 서서히 증가하고 있다. 장방형과 정사각형 유역형상에서는 횡방향의  $Q_p$ 가 가장 크며 이동속도가 빠르면  $Q_p$ 는 점차 작아지고 있으나, 신장형 하류방향에서는 이동속도가 빨라지면  $Q_p$ 가 점차 커짐을 알 수 있다.

그림 8은 강우이동속도에 대한 유출시점을 도시한 것이며, 상류방향에 대하여는 모든 경우 강우이동속도와 유속에 독립적으로, 유역출구에서 발생하는 최초의 강우에 의하여 유출이 발생하므로 동일한 곡선으로 나타났다. 그림을 비교하면 상류방향은 하류방향보다 일찍 유출이 발생하며, 횡방향은 그 중간임을 보여준다. 하류방향의 경우 장방형의 유출이 가장 빨리 나타나고 신장형에서 가장 늦게 나타났으나 횡방

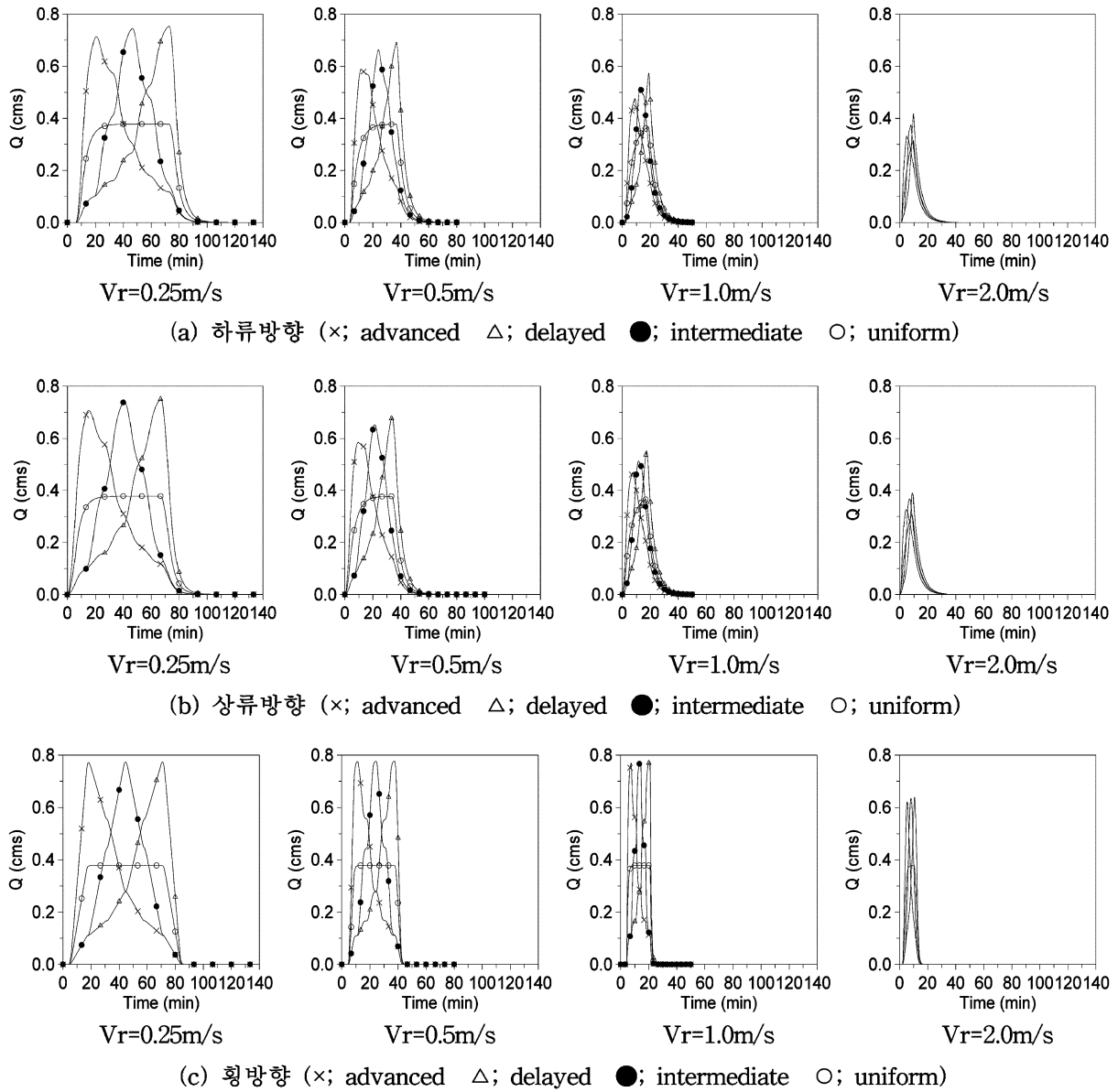


그림 5. 장방형 유역

표 1. 이동강우에 의한 유역형상별 침투유량과 침투시간 단위; 침투유량(cms), 침투시간(min)

강우이동 속도(m/s)	이동방향	유역형상	강우분포형			총유출량 (m <sup>3</sup> )
			균등 분포형	전진형	지연형	
V <sub>r</sub> =0.10	하류방향	신장형	0.3778	■0.6034(167.00)	0.6014 (255.17)	0.5848 (210.67)
		정4각형		0.7669 (69.83)	■0.7722(201.67)	0.7711 (135.67)
		장방형		0.7749 (47.33)	■0.7769(180.33)	0.7765 (113.83)
	상류방향	신장형	0.3778	0.5708 (87.67)	0.5719(167.33)	■0.5719(133.33)
		정4각형		0.7515 (37.50)	■0.7577(167.33)	0.7559 (102.33)
		장방형		0.7744 (33.50)	■0.7768(166.67)	0.7763 (100.00)
	횡방향	신장형	0.3778	0.7772 (33.83)	■0.7776(166.83)	0.7775 (100.83)
		정4각형		0.7778 (33.83)	■0.7778(166.83)	0.7778 (100.33)
		장방형		■0.7512 (42.50)	0.7487 (171.33)	0.7444 (108.50)
V <sub>r</sub> =0.25	하류방향	신장형	0.3778	■0.6278 (67.00)	0.6248 (105.07)	0.5968 (87.20)
		정4각형		0.7473 (29.93)	■0.7634 (81.80)	0.7598 (55.60)
		장방형		0.7138 (20.67)	■0.7549 (72.73)	0.7456 (46.47)
	상류방향	신장형	0.3778	0.5484 (37.80)	0.5489 (67.40)	■0.5627 (53.33)
		정4각형		0.7161 (17.47)	■0.7304 (67.27)	0.7267 (42.27)
		장방형		0.7067 (15.27)	■0.7514 (66.87)	0.7407 (40.67)

표 1. 계속

강우이동 속도(m/s)	이동방향	유역형상	강우분포형				총유출량 (m <sup>3</sup> )
			균등 분포형	전진형	지연형	중앙집중형	
V <sub>r</sub> =0.25	횡방향	신장형	0.3778	0.7396 (14.67)	■0.7654 (67.33)	0.7599 (40.80)	1511.0
		정4각형		0.7761 (15.00)	■0.7772 (68.00)	0.7770 (41.47)	
		장방형		0.7719 (18.20)	■0.7741 (70.93)	0.7739 (44.53)	
V <sub>r</sub> =0.5	하류방향	신장형	0.3778	■0.6573 (34.13)	0.6572 (54.50)	0.6222 (46.67)	755.5
		정4각형		0.7090 (16.53)	■0.7462 (41.83)	0.7372 (28.93)	
		장방형		0.5881 (11.70)	■0.6922 (36.90)	0.6632 (24.03)	
	상류방향	신장형	0.3778	0.5146 (21.00)	0.5129 (34.33)	■0.5339 (27.67)	
		정4각형		0.6669 (10.83)	■0.6902 (33.97)	0.6851 (22.30)	
		장방형		0.5845 (9.57)	■0.6803 (33.73)	0.6520 (21.27)	
	횡방향	신장형	0.3778	0.6184 (7.83)	■0.7160 (24.10)	0.6916 (20.90)	
		정4각형		0.7556 (8.67)	■0.7703 (35.03)	0.7673 (21.83)	
		장방형		0.7755 (11.13)	■0.7768 (37.53)	0.7766 (24.33)	
V <sub>r</sub> =1.0	하류방향	신장형	0.3721	0.6810 (17.65)	■0.6966 (29.43)	0.6940 (23.55)	377.8
		정4각형		0.6273 (9.47)	■0.7069 (21.82)	0.6855 (15.47)	
		장방형		0.4755 (8.87)	■0.5740 (18.83)	0.5199 (12.52)	
	상류방향	신장형	0.3702	0.4531 (12.67)	0.4477 (17.80)	■0.4657 (15.73)	
		정4각형		0.5933 (7.02)	0.6156 (17.45)	■0.6166 (12.42)	
		장방형		0.4671 (7.30)	■0.5516 (17.25)	0.5120 (11.58)	
	횡방향	신장형	0.3774	0.4982 (7.33)	■0.6063 (17.33)	0.5501 (10.72)	
		정4각형		0.6699 (5.08)	■0.7407 (18.33)	0.7241 (11.68)	
		장방형		0.7706 (7.50)	■0.7757 (20.83)	0.7747 (14.17)	
V <sub>r</sub> =1.5	하류방향	신장형	0.3778	0.6983 (12.44)	■0.7419 (20.87)	0.7319 (16.58)	251.8
		정4각형		0.5514 (8.28)	■0.6674 (15.08)	0.6321 (10.80)	
		장방형		0.3938 (6.13)	■0.4848 (12.78)	0.4275 (10.43)	
	상류방향	신장형	0.3384	0.4063 (9.85)	0.3986 (12.39)	■0.4136 (11.30)	
		정4각형		0.5247 (5.42)	0.5499 (12.03)	■0.5621 (9.03)	
		장방형		0.3843 (5.40)	■0.4583 (11.74)	0.4251 (8.98)	
	횡방향	신장형	0.3777	0.4157 (5.03)	■0.5086 (11.66)	0.4454 (7.57)	
		정4각형		0.5696 (4.07)	■0.6793 (12.31)	0.6472 (8.07)	
		장방형		0.6917 (5.71)	■0.7349 (13.99)	0.7234 (9.74)	
V <sub>r</sub> =2.0	하류방향	신장형	0.3331	0.6964 (9.99)	■0.7512 (16.66)	0.7391 (13.33)	188.9
		정4각형		0.5176 (6.66)	■0.6314 (11.66)	0.5800 (8.33)	
		장방형		0.3322 (4.67)	■0.4182 (9.66)	0.3754 (7.99)	
	상류방향	신장형	0.3242	0.3681 (8.44)	0.3577 (9.84)	■0.3695 (8.95)	
		정4각형		0.4697 (4.64)	0.4947 (9.36)	■0.5105 (7.17)	
		장방형		0.3263 (4.43)	■0.3906 (8.99)	0.3671 (6.98)	
	횡방향	신장형	0.3778	0.3521 (3.97)	■0.4344 (8.84)	0.3933 (7.06)	
		정4각형		0.5244 (4.27)	■0.6135 (9.37)	0.5789 (6.43)	
		장방형		0.6221 (5.47)	■0.6395 (10.69)	0.6349 (8.15)	

주) ■:유역형상별 가장 큰 침두유량 ■:강우이동방향별 가장 큰 침두유량

향의 경우는 이와 반대의 현상이 생긴다.

표 1은 자연하천에서 흔히 발생할수 있는 V<sub>p</sub>=0.3 m/s, V<sub>c</sub>=1.2 m/s에 대한 것이다. 지표면유속 V<sub>p</sub>와 하도유속 V<sub>c</sub>의 영향으로 가장 큰 침두유량을 나타내는 강우분포형을 분석하기 위하여 C<sub>p</sub>≤1, C<sub>c</sub>≥1의 조건을 만족하는 여러가지

V<sub>p</sub>, V<sub>c</sub>에 대하여 신장형과 장방형유역 그리고 상류방향과 하류방향에 대하여만 분석하였다. 그 결과를 표 5에 나타내었으며, 표 1과 동일한 결과를 보여주고 있다. ■표시는 유역형상별로 가장 큰 침두유량을 나타내는 강우분포형을 표시한 것이며, ( )는 침두시간이다.

표 2. 강우이동방향별 최대 침투유량을 나타내는 유역형상

강우이동방향 \ 이동속도	$V_r=0.1$ m/s	$V_r=0.25$ m/s	$V_r=0.5$ m/s	$V_r=1.0$ m/s	$V_r=1.5$ m/s	$V_r=2.0$ m/s
하류방향	장방형	정사각형	정사각형	신장형 정사각형	신장형	신장형
상류방향	장방형	정사각형 장방형	정사각형	정사각형	정사각형	정사각형
횡방향	정사각형	정사각형	장방형	장방형	장방형	장방형

표 3. 유역형상별로 최대 침투유량을 나타내는 강우분포형

강우이동방향 \ 유역형상	장방형	정사각형	신장형
하류방향	지연형	지연형	전진형 지연형
상류방향	지연형	지연형 중앙집중형	중앙집중형
횡방향	지연형	지연형	지연형

5. 결 론

본 연구에서는 유역형상의 변화에 따라서 이동강우가 유출에 미치는 영향을 운동과이론을 적용하여 분석한 것이며, 유역형상은 장방형유역과 신장형유역 그리고 정사각형 유역에 대하여 분석하였으며, 이동강우 분포형은 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형을 사용하였다. 이와 같은 형상의 유역에 대하여 다양한 이동속도를 가진 강우가 유

표 4. 강우이동속도에 따라 최대 침투유량을 나타내는 강우이동방향

강우이동 속도(m/s)	신장형			정사각형			장방형		
	전진형	지연형	중앙 집중형	전진형	지연형	중앙 집중형	전진형	지연형	중앙 집중형
0.1	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	하류방향	하류방향	하류방향
0.25	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향
0.5	하류방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향
1.0	하류방향	하류방향	하류방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향
1.5	하류방향	하류방향	하류방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향	횡방향
2.0	하류방향	하류방향	하류방향	횡방향	하류방향	하류방향	횡방향	횡방향	횡방향

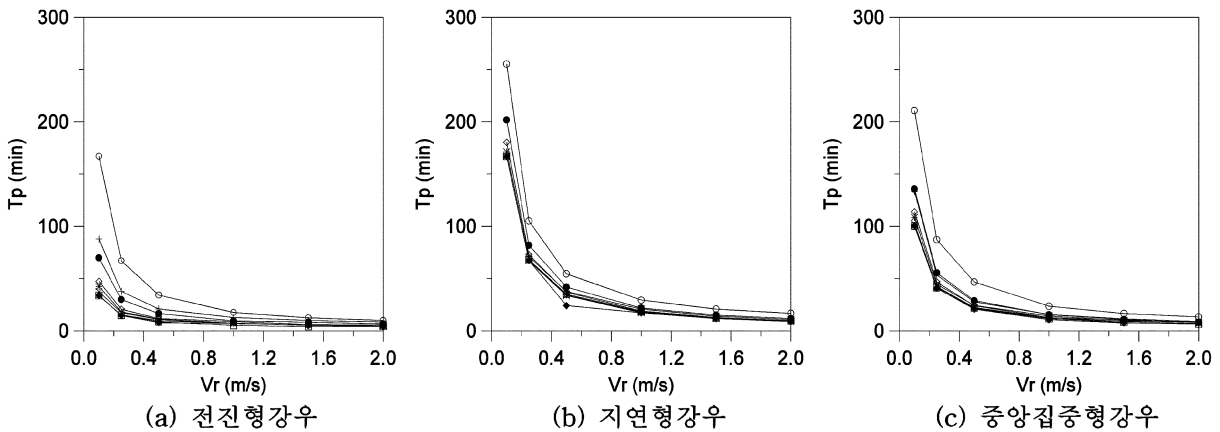


그림 6. 강우이동속도별 침투시간

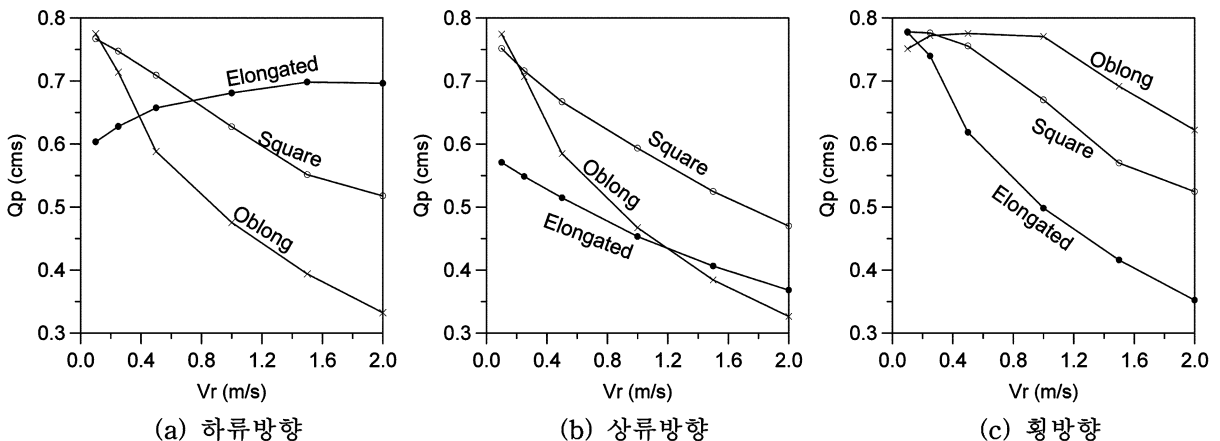


그림 7. 강우이동속도별 침투유량



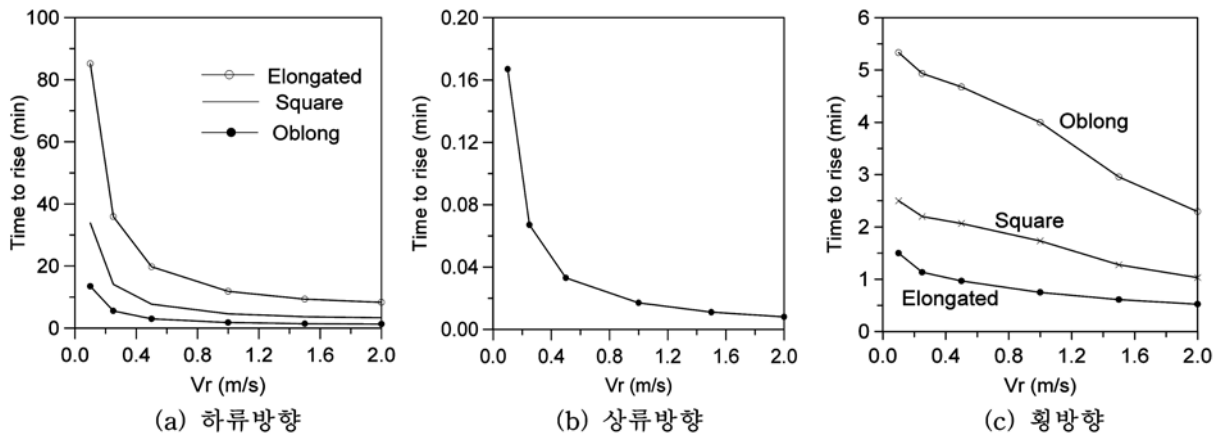


그림 8. 강우이동속도별 유출시점

표 5.  $V_p$ 와  $V_c$ 의 변화에 의하여 최대 침투유량을 나타내는 강우분포형

단위; 침투유량(cms), 침투시간(min)

강우이동 속도(m/s)	이동방향	유역형상	강우분포형			총유출량 ( $m^3$ )	
			$V_p, V_c$	전진형	지연형		중앙집중형
$V_i=0.25$	하류방향	신장형	1.0, 1.2	■0.6319 (66.73)	0.6280 (104.53)	0.5968 (81.87)	1511.0
			0.5, 2.5	■0.6058 (66.87)	0.6037 (102.53)	0.5863 (84.07)	
			0.5, 1.0	■0.6405 (66.87)	0.6369 (105.60)	0.6013 (85.07)	
			0.3, 1.5	■0.6182 (67.00)	0.6154 (104.20)	0.5926 (87.47)	
		장방형	1.0, 1.2	0.7773 (19.07)	■0.7776 (72.27)	0.7776 (45.67)	
			0.5, 2.5	0.7615 (19.33)	■0.7726 (72.27)	0.7703 (45.73)	
			0.5, 1.0	0.7628 (19.73)	■0.7729 (72.67)	0.7708 (46.13)	
			0.3, 1.5	0.7131 (20.60)	■0.7546 (72.67)	0.7452 (46.33)	
	상류방향	신장형	1.0, 1.2	0.5503 (37.47)	0.5529 (66.87)	■0.5630 (53.33)	
			0.5, 2.5	0.5672 (35.53)	0.5680 (67.07)	■0.5702 (53.33)	
			0.5, 1.0	0.5435 (38.47)	0.5452 (67.07)	■0.5602 (53.33)	
			0.3, 1.5	0.5548 (37.00)	0.5551 (67.40)	■0.5656 (53.33)	
		장방형	1.0, 1.2	0.7770 (13.33)	■0.7776 (66.67)	0.7774 (40.00)	
			0.5, 2.5	0.7594 (13.80)	■0.7720 (66.73)	0.7693 (40.13)	
			0.5, 1.0	0.7574 (13.87)	■0.7713 (66.73)	0.7683 (40.13)	
			0.3, 1.5	0.7075 (15.20)	■0.7518 (66.87)	0.7412 (40.67)	
$V_i=0.5$	하류방향	신장형	1.0, 1.2	■0.6695 (33.60)	0.6662 (54.17)	0.6222 (43.50)	755.5
			0.5, 2.5	■0.6246 (33.53)	0.6217 (52.50)	0.5960 (44.27)	
			0.5, 1.0	■0.6723 (33.87)	0.6714 (55.10)	0.6349 (46.27)	
			0.3, 1.5	■0.6458 (33.90)	0.6454 (53.83)	0.6111 (45.93)	
		장방형	1.0, 1.2	0.7642(10.10)	■0.7733 (36.53)	0.7714 (23.30)	
			0.5, 2.5	0.6862 (10.63)	■0.7430 (36.40)	0.7294 (23.33)	
			0.5, 1.0	0.6907 (10.87)	■0.7455 (36.83)	0.7328 (23.70)	
			0.3, 1.5	0.5877 (11.70)	■0.6912 (36.77)	0.6621 (23.93)	
	상류방향	신장형	1.0, 1.2	0.5182 (20.73)	0.5197 (33.63)	■0.5373 (27.17)	
			0.5, 2.5	0.5490 (18.87)	0.5490 (33.77)	■0.5631 (26.70)	
			0.5, 1.0	0.5035 (21.67)	0.5035 (34.00)	■0.5210 (27.97)	
			0.3, 1.5	0.5273 (20.27)	0.5252 (34.17)	■0.5467 (27.20)	
		장방형	1.0, 1.2	0.7700 (7.00)	■0.7704 (33.37)	0.7671 (20.10)	
			0.5, 2.5	0.6798 (7.97)	■0.7388 (33.47)	0.7240 (20.47)	
			0.5, 1.0	0.6751 (8.27)	■0.7349 (33.53)	0.7165 (20.60)	
			0.3, 1.5	0.5848 (9.43)	■0.6816 (33.73)	0.6531 (21.20)	

표 5. 계속

강우이동 속도(m/s)	이동방향	유역형상	강우분포형				총유출량 (m <sup>3</sup> )
			$Vp, Vc$	전진형	지연형	중앙집중형	
$V_r=1.0$	하류방향	신장형	1.0, 1.2	■0.7190 (16.93)	0.7171 (29.22)	0.7106 (23.33)	377.8
			0.5, 2.5	0.6515 (17.10)	■0.6517 (27.23)	0.6198 (23.32)	
			0.5, 1.0	0.7335 (17.33)	■0.7469 (30.10)	0.7457 (23.65)	
			0.3, 1.5	0.6620 (17.60)	■0.6713 (28.62)	0.6613 (23.42)	
		장방형	1.0, 1.2	0.6957 (5.58)	■0.7482 (18.65)	0.7364 (12.08)	
			0.5, 2.5	0.5542 (8.30)	■0.6651 (18.47)	0.6297 (12.10)	
			0.5, 1.0	0.5517 (8.73)	■0.6728 (18.87)	0.6366 (12.37)	
			0.3, 1.5	0.4748 (8.77)	■0.5719 (18.75)	0.5191 (12.48)	
	상류방향	신장형	1.0, 1.2	0.4584 (12.48)	0.4586 (16.98)	■0.4667 (15.22)	
			0.5, 2.5	0.5158 (10.47)	0.5133 (17.23)	■0.5353 (13.83)	
			0.5, 1.0	0.4383 (13.40)	0.4356 (17.37)	■0.4444 (16.25)	
			0.3, 1.5	0.4732 (11.85)	0.4680 (17.80)	■0.4895 (15.02)	
		장방형	1.0, 1.2	0.6698 (4.30)	■0.7300 (16.78)	0.7141 (10.38)	
			0.5, 2.5	0.5510 (6.68)	■0.6533 (16.93)	0.6202 (10.78)	
			0.5, 1.0	0.5505 (6.70)	■0.6433 (17.03)	0.6130 (11.05)	
			0.3, 1.5	0.4680 (7.25)	■0.5540 (17.20)	0.5127 (11.48)	
$V_r=2.0$	하류방향	신장형	1.0, 1.2	0.7774 (9.98)	■0.7777 (16.65)	0.7776 (13.32)	188.9
			0.5, 2.5	0.6662 (8.92)	■0.6840 (14.67)	0.6808 (11.80)	
			0.5, 1.0	0.7334 (10.16)	■0.7622 (16.67)	0.7556 (13.38)	
			0.3, 1.5	0.6658 (9.58)	■0.7281 (15.87)	0.7128 (92.66)	
		장방형	1.0, 1.2	0.5522 (4.66)	■0.6821 ((9.66)	0.6443 (6.32)	
			0.5, 2.5	0.4392 (4.47)	■0.5328 (9.43)	0.4747 (6.30)	
			0.5, 1.0	0.4417 (4.72)	■0.5392 (9.70)	0.4754 (6.47)	
			0.3, 1.5	0.3315 (4.64)	■0.4154 (9.59)	0.3744 (7.89)	
	상류방향	신장형	1.0, 1.2	0.3751 (8.36)	0.3718 (8.78)	■0.3758 (8.48)	
			0.5, 2.5	0.4551 (6.27)	0.4484 (9.02)	■0.4693 (7.83)	
			0.5, 1.0	0.3424 (9.10)	0.3396 (9.48)	■0.3426 (9.22)	
			0.3, 1.5	0.3951 (7.63)	0.3849 (9.62)	■0.4018 (8.70)	
		장방형	1.0, 1.2	0.5500 (3.36)	■0.6314 (8.58)	0.6052 (5.68)	
			0.5, 2.5	0.4314 (3.77)	■0.5131 (8.67)	0.4717 (5.90)	
			0.5, 1.0	0.4255 (4.02)	■0.4975 (8.86)	0.4698 (6.35)	
			0.3, 1.5	0.3268 (4.32)	■0.3933 (8.92)	0.3679 (6.94)	

주) ■: 유역형상별 가장 큰 침투유량을 나타내는 강우분포형

역내 하천의 상류방향, 하류방향, 횡방향으로 이동할 때 강우분포형에 따르는 유출수문곡선을 모의하여 그 특성을 비교분석하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 수문곡선의 모양과 침투유량 및 침투시간은 유역형상과 강우이동방향과 이동속도 그리고 강우분포형에 따라 그 크기가 변화하여 유출에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 강우분포형이 시간에 대하여 불변인 경우 강우이동속도가 증가하면 유속에 무관하게 유출량은 감소하고, 침투유량은 작아지고, 기저시간은 짧아지는 것으로 나타났다.
2. 강우이동방향과 이동속도에 따라 가장 큰 침투유량을 나타내는 유역형상을 분석한 결과 상류방향으로 강우이동속도가 느릴 때는 장방형의 침투유량이 가장 크게 나타나고 점차 빨라짐에 따라 정사각형의 침투유량이 크게 나타났

으나, 횡방향의 경우는 이와 반대의 현상을 보여 주고 있으며 이것은 모든 강우 분포형에서 공통된 성질을 보여 주고 있다. 또한 최대 침투유량을 나타내는 강우분포형은 강우이동속도와 이동방향 그리고 유역형상에 관계없이 대체로 지연형 강우분포형의 침투유량이 다른 분포형보다 크게 나타났다.

3. 침투시간은 이동속도가 증가함에 따라 지수적으로 급격히 빨라져서 일정한 값에 수렴하고 있으며, 지연형 강우에서 침투시간이 가장 길고 전진형 강우에서 가장 짧으며, 신장형 유역의 경우 하류방향에서 침투시간이 매우 길게 나타났다. 상류방향에 대하여는 모든 경우 강우이동속도에 독립적으로 유출이 발생하므로 이동속도와 무관한 동일한 곡선으로 나타났다. 하류방향의 경우 장방형에서 유출이 가

장 빨리 나타나고 신장형에서 가장 늦게 나타났으나 횡방향의 경우는 이와 반대의 현상이 생긴다. 또한 상류방향은 하류방향보다 일찍 유출이 발생하며, 횡방향은 그 중간임을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 한국과학재단에서 위탁 시행한 2004년도 특정연구개발사업중 “웹기반 홍수정보 시스템 Prototype 개발사업”(과제번호 : M1-0402-02-0002-04-002-02-000-00)에 의한 연구로서 관계당국에 감사드립니다.

### 참고문헌

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.

한건연, 전민우, 최규현(2004) 이동강우에 의한 유출영향분석. *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제37권 제10호, pp. 823-836.

de Lima, J.L.M.P. 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, J.L.M.P. and Singh, V.P. (2003) Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow. *Physics*

*and Chemistry of the Earth*, 28, pp. 277-282.

Maksimov, V.A. (1964) Computing runoff produced by a heavy rainstorm with a moving center.”*Sov. Hydrol.*, 5, pp. 510-513.

Marshall, R.J. (1980) The estimation and distribution of storm movement and storm structures, using a correlation analysis technique and raingage data. *J. of Hydrology*, 187, pp. 19-39.

Ogden, F.L., Richardson, J.R. and Julien, P.Y. (1995) Similarity in catchment response, 2. Moving rainstorms. *Water Resour. Resear.*, Vol. 31(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. (1996) *Kinematic wave modelling in water resources; surfacewater hydrology*. Chichester, John Wiley and Sons Ltd.

Singh, V.P. (1997) Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on streamflow hydrograph. *Hydrol. Process.*, 11, pp. 1649-1669.

Singh, V.P. (1998) Effect of the direction of storm movement on planar flow. *Hydrol. Process.*, 12, pp. 147-170.

Singh, V.P. (2002a) The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow. *Advances in Water Resources*, 25, pp. 817-828.

Singh, V.P. (2002b) Effect of the duration and direction of storm movement on planar flow with full and partial areal coverage. *Hydrol. Process.*, 16, pp. 3437-3466.

Tabios, G.O., Obysekera, J.T.B. and Shen, H.S. (1988) *The influence of storm movement on streamflow hydrograph through space-time rainfall generation and hydraulic routing*. Colorado State Uni., Fort Collins, Colorado.

(접수일:2005.5.19/심사일:2005.8.2/심사완료일 2005.9.20)