

비대칭 유역형상에 대한 이동강우의 유출영향분석

전 민 우*[†]

Runoff Analysis due to the Moving Rainstorms on the Nonsymmetric Basin Shapes

Min Woo Jeon*[†]

요약 : 비대칭형상의 유역에서 이동강우로 인한 유출영향을 운동파이론을 적용하여 분석하였다. 이동강우 분포형은 균등분포형, 전진형, 지연형 및 중앙집중형을 사용하였고, 비대칭유역형상은 정사각형, 신장형, 및 장방형유역에 대하여 분석하였다. 다양한 이동속도를 가진 이동강우가 비대칭유역의 상류, 하류 및 횡방향으로 이동할 때 유출수문곡선을 모의하여 그 특성을 대칭유역과 비교분석하였다. 하류방향에 대하여 신장형유역에서 대칭과 비대칭유역의 첨두유량 차이가 가장 작은 반면에 장방형유역에서 가장 큰 차이를 보여주고 있으며, 이것은 상류방향에서도 동일하게 나타났다. 횡방향에서는 대칭, 좌비대칭 및 우비대칭유역 모두 지연형 강우에서 가장 큰 첨두유량을 그리고 전진형강우에서 가장 작은 첨두유량을 보이고 있다. 첨두시간은 장방형유역에서 가장 길게 나타나고 신장형유역에서 가장 짧게 나타났다.

핵심용어 : 이동강우, 비대칭유역형상, 이동방향

Abstract : The influence of moving rainstorms to runoff was analysed for the nonsymmetric shaped basins using kinematic wave theory. The distribution types of moving rainstorms are uniform, advanced, delayed and intermediate type, the nonsymmetric shaped basins are square, oblong and elongated shape. The runoff hydrographs were simulated and the characteristics were compared with the symmetric shaped basins for the rainstorms moving up, down and cross the basins with various velocities. The smallest differences of peak runoff of symmetric and nonsymmetric basins are appeared in the case of elongated basin, and the largest differences are shown at the oblong basin for the downstream direction. The identical results are shown for the upstream direction. The greatest peak runoff differences are shown in the delayed type rainstorm and the smallest differences are in the advanced type rainstorm for the crossstream direction. The oblong shaped basin generates the longest peak time and shortest peak time for the elongated shape basin.

Keywords : Moving rainstorm, Nonsymmetric basin shape, Moving direction

1. 서 론

최근의 수문학은 강우-유출현상에 대하여 보다 더 상세하고 믿을 만한 정보를 요구하고 있으며, 유출수문곡선에 영향을 미치는 인자는 크게 유역특성과 강우특성으로 대별할 수 있다. 유역특성은 유역면적, 유역형상, 유역경사, 식생, 조도, 토지

이용 등이며 강우특성은 강우량, 강우강도, 강우지속기간, 강우이동속도, 강우이동방향 등을 들 수 있다. 유역응답을 지배하는 앞에서 언급된 요소들은 유역형상에 따라 변하여 이와 같은 유역특성 중에서 유역형상이 장방형(좌우로 긴 유역) 또는 신장형(상하로 긴 유역)에 따라 유출특성이 다르게 되며, 강우특성중에서 강우이동속도와 이동방

[†] Corresponding author : minwoo@chungbuk.ac.kr

* 정회원 · 충북대학교 토목공학부 교수

향이 유출에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 알려져 있다. 강우이동방향은 하도의 흐름방향을 기준으로 하여 하류방향, 상류방향, 횡방향으로 구별할 수 있다. 이러한 요소들은 시간과 공간적으로 변하며, 요소들의 시간적 공간적 가변성은 수문곡선에 심각한 영향을 주고 있다. 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 연구는 최근 이동강우의 방향과 속도가 토양유실에 크게 영향을 주며, 토양유실은 상류방향보다 하류방향 이동강우에 의하여 더 크게 발생한다는 것이 입증되었다(Lima 등, 2003). 침투유량이 이동강우방향과 이동속도에 매우 민감하게 반응한다는 Surkan(1974)의 연구이후, 이동강우에 대한 연구가 Lima 등(1999)과 Singh(1997, 1998, 2002a, 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 입증하였으며, Tabios 등(1998)은 유역모양과 크기가 유출에 미치는 이동강우의 영향을 확률론적으로 분석하였다. Lima 등(2003)은 이동강우가 지표면유출에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였으며, 최근 Lee와 Huang(2007)은 이동강우에 대한 평형유량의 조건을 연구하였다. 국내 연구로서는 최계운 등(1992), 최계운 등(2000), 한건연 등(2006)을 들 수 있다.

지금까지 이동강우에 관한 대부분의 연구는 지표면에서 상류, 하류로 이동하는 강우에 의한 유출영향을 분석한 것이었으며, 비대칭 유역형상과 횡방향의 이동강우에 대하여는 다루지 못하였다. 한건연 등(2006)의 연구는 대칭유역과 정사각형 유역 만을 다루었으나 본 연구에서는 비대칭 유역형상에 따르는 유출특성을 구명하고자 한다. 유역

형상은 신장형유역과 장방형유역 그리고 정사각형 유역에 대하여 분석하였으며, 이동강우 분포형은 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형을 사용하였다. 이와 같은 비대칭형상의 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-Venant방정식을 간략화하여 해석적 해를 구하는 대표적인 방법이 운동과모형이며, 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 측방향 유입이 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.

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

$$q = \alpha h^\beta \tag{2}$$

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 $\alpha = \frac{\sqrt{S_f}}{N_p}$ (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 h 에 대해 정리한 후 시간 t 에 대해 편미분하여 식 (1)에 대입하면 운동과방정식 (3)을 얻을 수 있으며, 이때 V_p 는 지표면흐름의 평균유속이다.

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

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(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 의하

여 $a = \frac{\sqrt{S_f}}{N_c P^{2/3}}$ (N_c =하도의 흐름저항을 나타내는 조도계수), $b = 5/3$ 가 되며, 이때 P 는 율변이다.

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

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

식 (3)과 (6)은 시간과 공간적으로 유량의 변화를 나타내는 비선형 1차원 편미분방정식이지만, 비선형성이 우세하지 않기 때문에 선형론에 의하

여 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 차분화시키면 지표면흐름과 하도흐름에 대하여 각각 식 (7),(8)과 같다.

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

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

여기서 Courant수 C_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. 이때 지표면흐름에 대하여는 forward-in-time, backward-in-space차분법을 사용하였으며, 안정해를 얻기 위하여 $C_p \leq 1$ 의 조건을 만족해야 한다. 반면에 하도흐름에서는 forward-in-space, backward-in-time차분법을 사용하고 $C_c \geq 1$ 의 조건을 만족해야 한다. 여기서 i =공간격자점, n =시간격자점을 나타낸다.

3. 유역형상 및 이동강우강도 분포형

자연하천유역은 그 형상이 다양하지만, 해석의 어려움을 피하고 유역의 유출현상을 수리학적으로 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, 본 연구에서는 동일한 유역면적 $40000m^2$ 로서 신장형유역(폭80m×길이500m), 정사각형유역(폭200m×길이200m), 장방형유역(폭500m×길이80m)의 3가지 모형유역을 설정하였다.

2개의 직사각형 지표면으로 이루어진 유역을 가정하고, 이 지표면으로부터의 유출은 지표면사이에 있는 하천으로 측방향유입되어 유역출구로

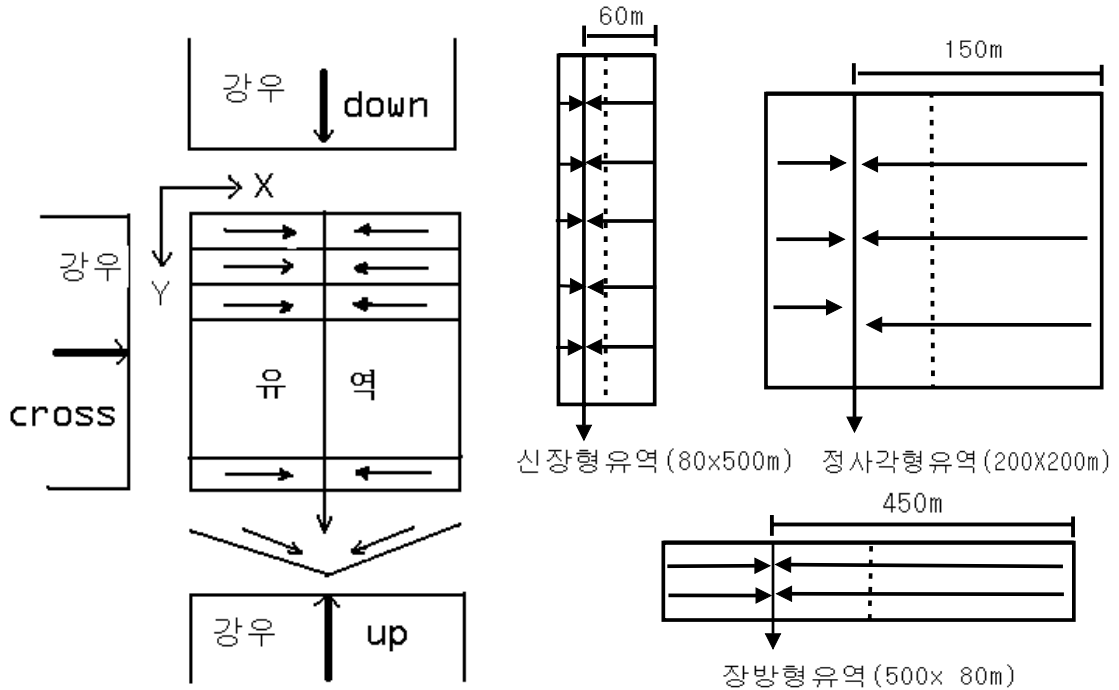


그림 1. 강우이동방향과 비대칭유역형상

유출된다. 지표면에서의 평균유속은 0.3m/s, 하천의 평균유속은 1.2m/s라 가정하였다. 그림 1에 하도를 중심으로 대칭유역(점선)에 대한 비대칭유역(실선)을 나타내었다. 이와 같이 설정된 3가지 비대칭형상의 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.

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

강우의 시간적 변화는 강우주상도에 의하여 표현되지만, 일정한 길이를 가진 강우가 공간상에서 이동하는 경우, 강우의 이동속도에 의하여 지표면

유출에 기여하는 강우의 시간적 분포를 내포하게 된다. 본 연구에서는 시간적으로 일정한 분포형을 가진 강우가 설정된 비대칭 모형유역을 이동하는 경우, 유출에 미치는 영향을 분석하였으며, 간편성을 위하여 손실강우는 고려하지 않았다. 강우의 공간적 분포형을 균등분포형(uniform type), 전진형(advanced type), 지연형(delayed type), 중앙 집중형(centered type)으로 설정하여 그림 2에 나타내었으며, 모든 경우 총강우량은 170mm/hr, 강우의 길이는 1000m이다.

이동강우에 의한 유출을 모의하기 위하여 x방향에 대하여 Δx , y방향에 대하여 Δy 로 이산화한 유역을 Δt 시간 간격으로 강우를 이동시키므로서 유출추적을 하였으며, 강우의 이동속도는 횡방향의 경우 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, 종방향의 경우 $\frac{\Delta y}{\Delta t}$ 로 나타내었다. Singh(1997)에 의하면 강우이동속도는 7~35 km/hr까지 관측된 바 있으며, Marshall(1980)에 의하면 219개의 강우중에서 0~8.3m/s가 26%,

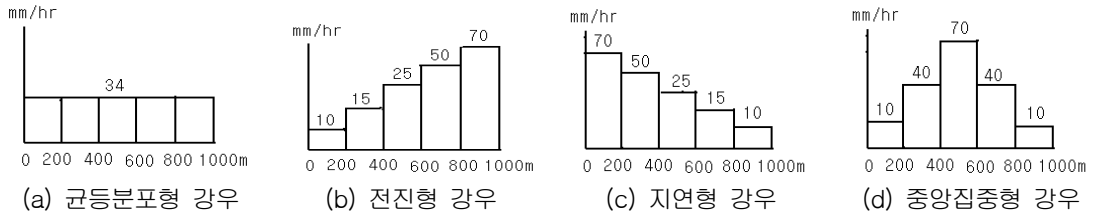


그림 2. 이동강우강도의 공간적 분포형

8.3~16.7m/s가 60%, 16.7m/s 이상이 14%를 차지하고 있다. 본 연구에서는 모형유역의 크기를 고려하여 이동속도범위 $V_r=0.25\sim 2.0\text{m/s}$ 를 사용하였다.

4. 적용 및 분석

4.1 하류방향 이동강우

주어진 강우강도와 길이를 가진 강우가 모형유역을 이동할때 강우이동속도에 따라 유역내 총강우량이 달라진다. 하류방향의 경우, 최상류 지표면에 내린 강우는 하도흐름을 이루어 차례로 유역출구에서 유출로 나타나며, 공간분포하는 이동강우의 영향을 분석하기 위하여 그림 2의 4가지 강우분포형의 이동강우를 3가지 비대칭형상을 갖는 모형유역에 중.횡단 이동시키므로서 유출모의를 하였다. 그 결과를 강우이동속도 $V_r=0.25, 0.5, 1.0, 2.0\text{m/s}$ 그리고 신장형유역, 정사각형유역, 장방형유역에 대하여 그림 3~5에 나타내었으며, 이에 대한 첨두유량 Q_p 와 첨두시간 T_p 의 분석결과를 표 1에 나타내었다.

□ 표시는 동일한 강우이동속도에서 유역형상별로 가장 큰 첨두유량을 나타내는 이동강우분포형을 표시한 것이며, 대칭유역에 대한 비대칭유역의 첨두유량의 비를 나타내었다. ()내의 값은 첨두시간을 나타내고 있으며, 균등분포형강우는 첨두유량이 발생하지 않으므로 표에 나타내지 않았다.

하류방향에서는 대칭유역 비대칭유역 모두 자연형강우에서 가장 큰 첨두유량을 그리고 전진형에서 가장 작은 값을 보이고 있다. 첨두시간은 신장형에서 가장 길게 나타나며, 장방형에서 가장 짧게 나타났다. 대칭유역과 비대칭유역을 비교해보면 비대칭유역의 첨두유량은 이동속도가 느릴때는 대칭유역의 첨두유량과 큰 차이가 없으나 이동속도가 빠를수록 비대칭유역의 첨두유량이 대칭유역보다 작아지고 있다. 이것은 모든 유역형상과 모든 강우분포형에 관계없이 동일한 현상을 보여 주며 상류방향에서도 마찬가지이다. 3가지 유역형상에 대한 대칭과 비대칭유역의 첨두유량을 비교해 보면 신장형유역에서 그 차이가 가장 작은 반면에 장방형유역에서 가장 큰 차이를 보여주며,

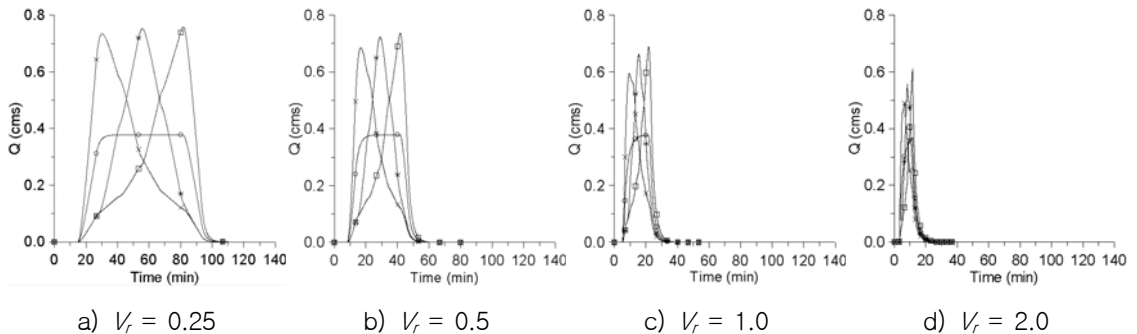


그림 3. 정4각형비대칭유역의 수문곡선 비교 (하류방향)
(○:균등분포형, ×:전진형, □:자연형, *:중앙집중형)

전민우

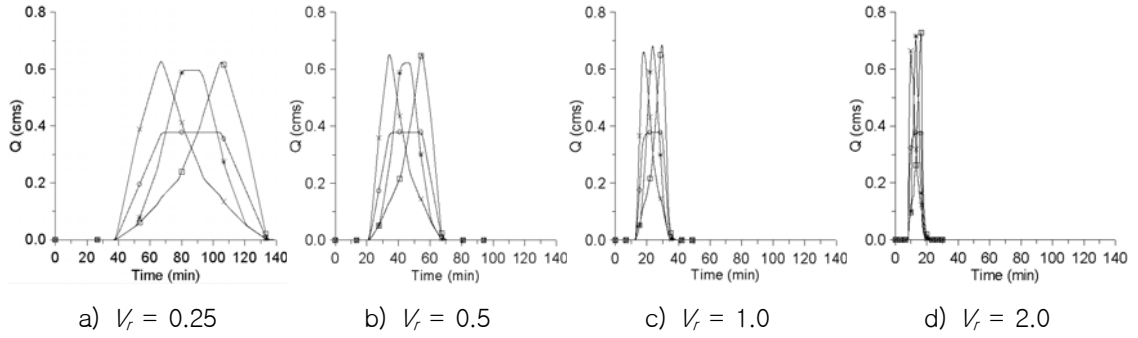


그림 4. 신장형비대칭유역의 수문곡선 비교 (하류방향)
 (○:균등분포형, ×:전진형 5, □:지연형, *:중앙집중형)

표 1. 대칭유역과 비대칭유역의 첨두유량 비교 (하류방향) ; Q_p (cms) T_p (min)

유역형상	강우 분포형	이동속도	비대칭유역	대칭유역	Q_p 비대칭/대칭	T_p 비대칭/대칭
정사각형	전진형	0.25	0.72800(30.53)	0.74728(29.93)	0.974	1.020
		0.5	0.67316(16.97)	0.70900(16.63)	0.949	1.020
		1.0	0.57781(9.55)	0.62730(9.47)	0.921	1.008
		2.0	0.47544(6.66)	0.51760(6.66)	0.919	1.000
	지연형	0.25	0.75555(81.80)	0.76340(81.80)	0.990	1.000
		0.5	0.72981(41.87)	0.74620(41.83)	0.978	1.001
		1.0	0.67698(21.82)	0.70690(21.82)	0.958	1.000
		2.0	0.59101(11.66)	0.63140(11.66)	0.936	1.000
	중앙 집중형	0.25	0.74894(55.73)	0.75980(55.60)	0.986	1.002
		0.5	0.71509(29.03)	0.73720(28.93)	0.970	1.003
		1.0	0.64728(15.48)	0.68550(15.47)	0.944	1.001
		2.0	0.53577(8.33)	0.58000(8.33)	0.924	1.000
신장형	전진형	0.25	0.62567(67.00)	0.62783(66.93)	0.997	1.001
		0.5	0.65051(34.23)	0.65726(34.13)	0.990	1.003
		1.0	0.65977(17.88)	0.68100(17.63)	0.969	1.014
		2.0	0.64630(9.99)	0.69684(9.99)	0.927	1.000
	지연형	0.25	0.62254(105.10)	0.62481(105.00)	0.996	1.001
		0.5	0.65132(54.57)	0.65722(54.50)	0.991	1.001
		1.0	0.68536(29.45)	0.69663(29.42)	0.984	1.001
		2.0	0.72890(16.66)	0.75150(16.66)	0.970	1.000
	중앙 집중형	0.25	0.59682(89.20)	0.59682(87.20)	1.000	1.023
		0.5	0.62203(46.67)	0.62221(46.67)	1.000	1.000
		1.0	0.68132(23.60)	0.69405(23.53)	0.982	1.003
		2.0	0.70820(13.33)	0.73936(13.33)	0.958	1.000
장방형	전진형	0.25	0.61587(22.00)	0.71382(20.67)	0.863	1.064
		0.5	0.49839(16.90)	0.58814(16.40)	0.847	1.030
		1.0	0.37120(8.92)	0.47555(8.85)	0.781	1.008
		2.0	0.25171(4.66)	0.33221(4.66)	0.758	1.000
	지연형	0.25	0.70960(72.87)	0.75492(72.73)	0.940	1.002
		0.5	0.60695(36.90)	0.69221(36.87)	0.877	1.001
		1.0	0.46710(18.82)	0.57403(18.82)	0.814	1.000
		2.0	0.32797(9.66)	0.41849(9.66)	0.784	1.000
	중앙 집중형	0.25	0.68424(46.80)	0.74558(46.40)	0.918	1.009
		0.5	0.55818(24.20)	0.66320(24.00)	0.842	1.008
		1.0	0.40603(12.45)	0.51987(12.40)	0.781	1.004
		2.0	0.28389(7.99)	0.37540(7.99)	0.756	1.000

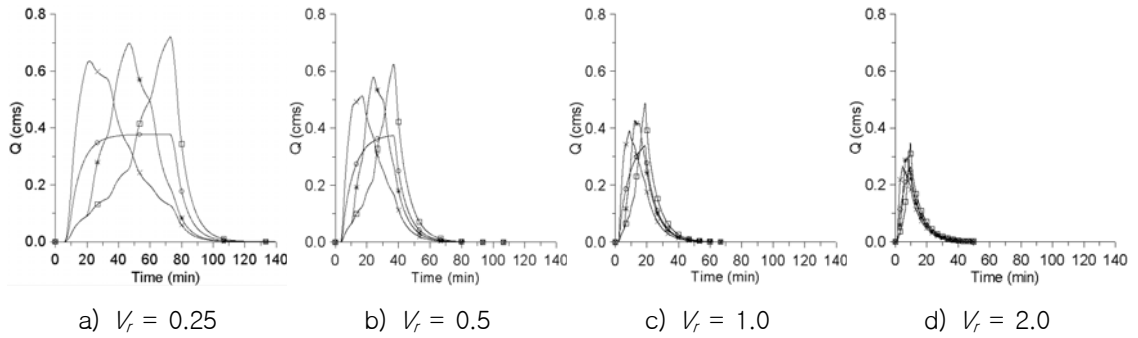


그림 5. 장방형비대칭유역의 수문곡선 비교 (하류방향)
 (○:균등분포형, ×:전진형, □:자연형, *:중앙집중형)

이것은 상류방향에서도 마찬가지이다. 강우이동속도가 빠를 수록 점차 대칭과 비대칭유역의 첨두유량차이가 커지고 있으며, 신장형유역에서는 대칭과 비대칭유역의 첨두유량이 유사하여 그 차이를 발견할수 없으며, 이것은 상류방향의 경우도 마찬가지이다. 대체로 대칭유역과 비대칭유역의 첨두시간은 큰 차이를 보이지 않고 있음을 알수 있다.

4.2 상류방향 이동강우

상류방향 이동강우의 경우는 하류방향의 경우와는 반대로 유역출구에 있는 지표면에서부터 유출이 시작되므로 역방향으로 유출을 계산한다. 그 결과를 강우이동속도 $V_r=0.25, 0.5, 1.0, 2.0\text{m/s}$ 그리고 신장형유역, 정사각형유역, 장방형유역에 대하여 그림 6~8에 나타내었으며, 이에 대한 첨두유량 Q_p 와 첨두시간 T_p 의 분석결과를 표 2에 나타내었다.

■ 표시는 동일한 강우이동속도에서 유역형상별로 가장 큰 첨두유량을 나타내는 이동강우분포형을 표시한 것이며, 대칭유역에 대한 비대칭유역의 첨두유량의 비를 나타내었다. 상류방향 이동강우의 경우, 대칭유역과 비대칭유역에 대하여 정4각형과 장방형유역에서는 자연형강우의 첨두유량이 가장 크고 전진형강우의 첨두유량이 가장 작은 반면에 신장형유역에서는 중앙집중형강우의 첨두유량이 가장 크고 자연형에서 가장 작아서 유역의 특성이 잘 반영된 결과라 생각된다. 또한 비대칭유역에서도 3가지 유역형상중에서 정사각형유

역의 첨두유량이 가장 크게 나왔으며, 첨두시간은 모두 자연형강우의 경우가 가장 크게 나타났다.

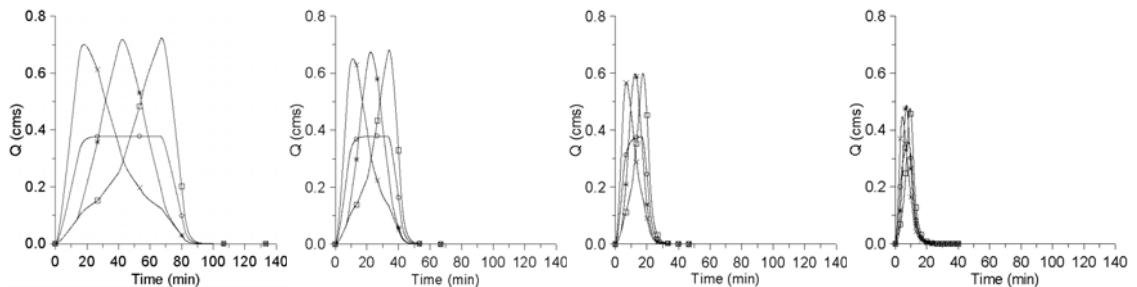
4.3 횡방향 이동강우

횡방향 이동강우의 경우는 지표면과 하도가 만나는 점까지는 강우이동방향과 지표면흐름이 같은 방향이 되지만 그 이후는 강우이동방향과 반대방향으로 지표면유출이 발생하므로 좌비대칭과 우비대칭의 경우로 분리하여 유출계산을 하였다. 그림 1의 비대칭 유역형상은 좌비대칭 형상을 나타낸 것이며, 우비대칭 형상은 하도가 우측에 위치한 비대칭 형상을 뜻한다. 유출해석 결과를 강우이동속도 $V_r=0.25, 0.5, 1.0, 2.0\text{m/s}$ 그리고 신장형유역, 정사각형유역, 장방형유역에 대하여 그림 9~14에 나타내었으며, 이에 대한 첨두유량 Q_p 와 첨두시간 T_p 의 분석결과를 표 3에 나타내었다.

■ 표시는 동일한 강우이동속도에서 유역형상별로 가장 큰 첨두유량을 나타내는 이동강우분포형을 표시한 것이며, 대칭유역에 대한 비대칭유역의 첨두유량의 비를 나타내었다. 횡방향에서는 대칭유역, 좌비대칭, 우비대칭유역 모두 자연형강우에서 가장 큰 첨두유량을 그리고 전진형에서 가장 작은 첨두유량을 보이고 있다. 첨두시간은 장방형에서 가장 길게 나타나며, 신장형에서 가장 짧게 나타났다. 좌비대칭유역에서 강우가 좌에서 우로 이동할 때 좌비대칭유역의 첨두유량은 이동속도가 느릴 때는 대칭유역의 첨두유량과 큰 차이가 없으나 이동속도가 빠를 때는 대칭유역의 첨두

표 2. 대칭유역과 비대칭유역의 첨두유량 비교 (상류방향) ; $Q_p(\text{cms})$ $T_p(\text{min})$

유역형상	강우 분포형	이동속도	비대칭유역	대칭유역	Q_p 비대칭/대칭	T_p 비대칭/대칭
정사각형	전진형	0.25	0.70063(18.07)	0.71608(17.47)	0.978	1.034
		0.5	0.64140(11.37)	0.66690(10.80)	0.962	1.053
		1.0	0.55629(7.15)	0.59331(7.02)	0.938	1.019
		2.0	0.43173(4.67)	0.46971(4.63)	0.919	1.009
	지연형	0.25	0.72348(67.27)	0.73041(67.27)	0.991	1.000
		0.5	0.67421(34.03)	0.69023(33.97)	0.977	1.002
		1.0	0.58866(17.50)	0.61558(17.45)	0.956	1.003
		2.0	0.46192(9.37)	0.49467(9.35)	0.934	1.002
	중앙 집중형	0.25	0.71807(42.40)	0.72672(42.27)	0.988	1.003
		0.5	0.66809(22.47)	0.68510(22.30)	0.975	1.008
		1.0	0.58747(12.58)	0.60664(12.40)	0.968	1.015
		2.0	0.46118(7.18)	0.49050(7.17)	0.940	1.001
신장형	전진형	0.25	0.54723(37.87)	0.54840(37.80)	0.998	1.002
		0.5	0.51243(21.03)	0.51459(21.00)	0.996	1.001
		1.0	0.45020(12.68)	0.45312(12.67)	0.994	1.001
		2.0	0.36424(8.43)	0.36804(8.43)	0.990	1.000
	지연형	0.25	0.54676(67.47)	0.54891(67.33)	0.996	1.002
		0.5	0.50895(34.50)	0.51291(34.33)	0.992	1.005
		1.0	0.44163(18.08)	0.44772(17.80)	0.986	1.016
		2.0	0.34977(10.15)	0.35765(9.83)	0.978	1.033
	중앙 집중형	0.25	0.56221(53.33)	0.56274(53.33)	0.999	1.000
		0.5	0.53159(27.73)	0.53392(27.67)	0.996	1.002
		1.0	0.46364(15.88)	0.46573(15.72)	0.996	1.010
		2.0	0.36425(9.18)	0.36942(8.95)	0.986	1.026
장방형	전진형	0.25	0.61155(17.07)	0.70672(15.20)	0.865	1.123
		0.5	0.49433(13.67)	0.58448(9.53)	0.846	1.434
		1.0	0.36296(7.53)	0.46709(7.28)	0.777	1.034
		2.0	0.24408(4.30)	0.32626(4.43)	0.748	0.971
	지연형	0.25	0.70425(66.93)	0.75141(66.80)	0.937	1.002
		0.5	0.59474(33.80)	0.68031(33.73)	0.874	1.002
		1.0	0.44766(17.20)	0.55160(17.23)	0.812	0.998
		2.0	0.30291(8.88)	0.39052(8.98)	0.776	0.989
	중앙 집중형	0.25	0.67786(41.20)	0.74070(40.60)	0.915	1.015
		0.5	0.54921(21.63)	0.65198(21.20)	0.842	1.020
		1.0	0.40033(11.65)	0.51199(11.58)	0.782	1.006
		2.0	0.27677(6.92)	0.36707(6.97)	0.754	0.993



a) $V_f = 0.25$

b) $V_f = 0.5$

c) $V_f = 1.0$

d) $V_f = 2.0$

그림 6. 정사각형비대칭유역의 수문곡선 비교 (상류방향)

(○:균등분포형, ×:전진형, □:지연형, *:중앙집중형)

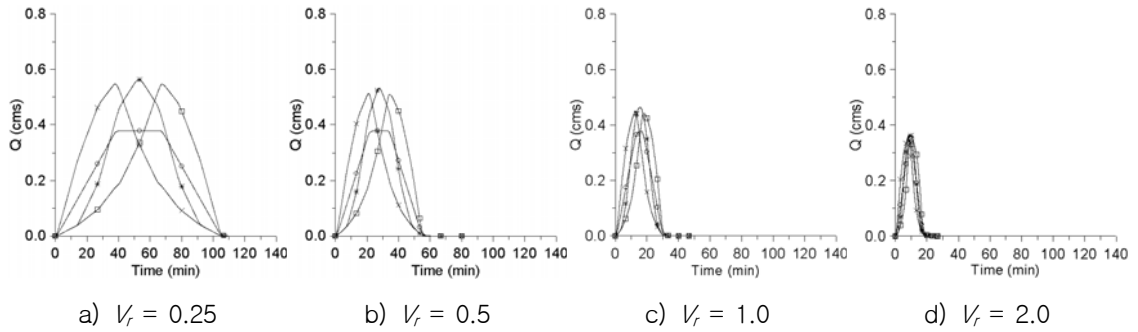


그림 7. 심장형비대칭유역의 수문곡선 비교 (상류방향)
(○:균등분포형, ×:전진형 5, □:지연형, *:중앙집중형)

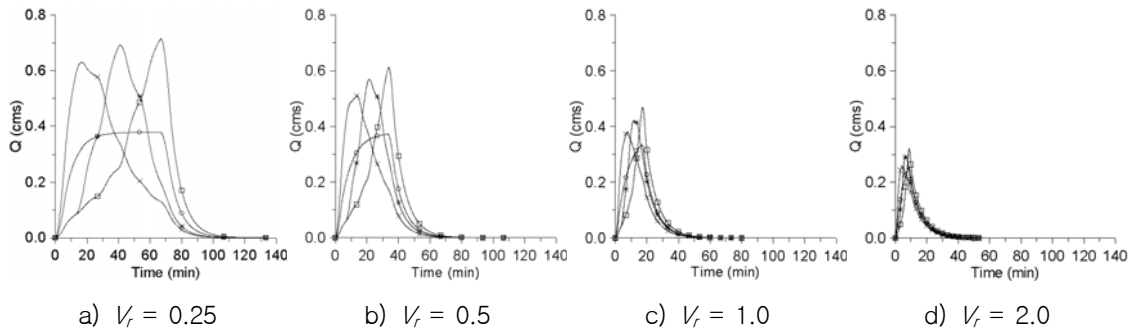


그림 8. 장방형비대칭유역의 수문곡선 비교 (상류방향)
(○:균등분포형, ×:전진형 5, □:지연형, *:중앙집중형)

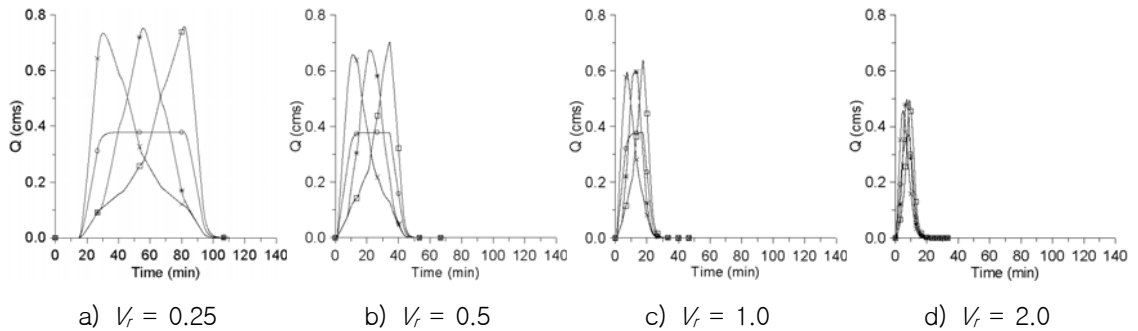


그림 9. 정사각형 좌비대칭유역의 수문곡선 비교 (횡방향)
(○:균등분포형, ×:전진형 5, □:지연형, *:중앙집중형)

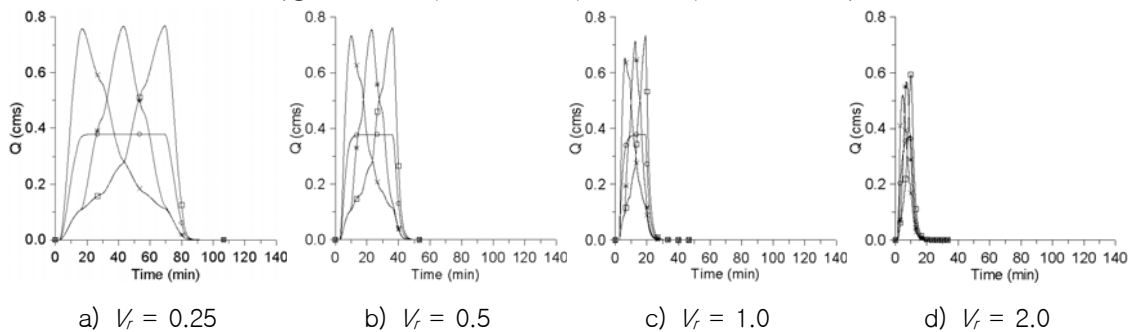
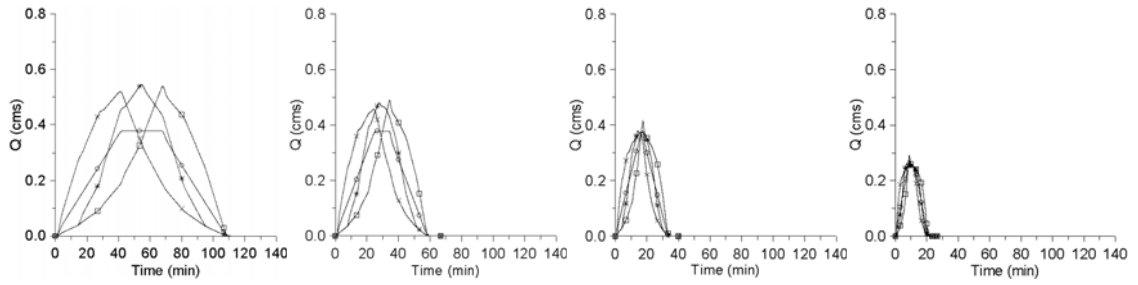
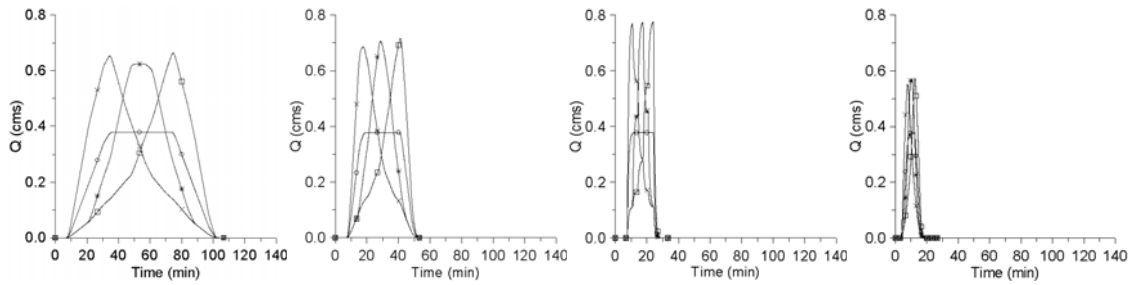


그림 10. 정사각형 우비대칭유역의 수문곡선 비교(횡방향)
(○:균등분포형, ×:전진형 5, □:지연형, *:중앙집중형)



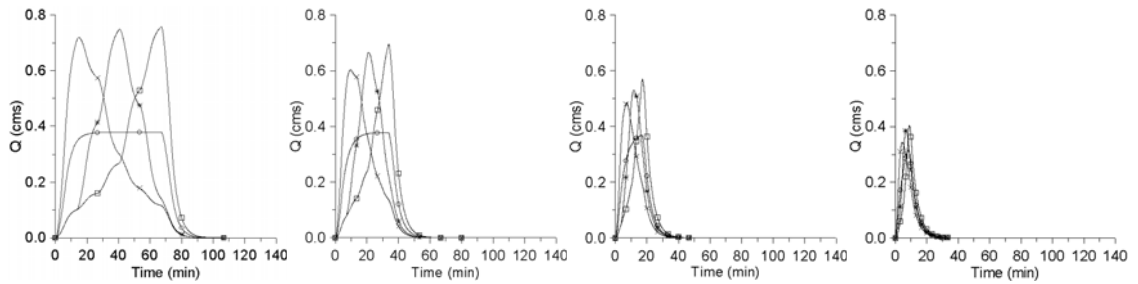
a) $V_r = 0.25$ b) $V_r = 0.5$ c) $V_r = 1.0$ d) $V_r = 2.0$

그림 11. 장방형 좌비대칭유역의 수문곡선 비교(횡방향)
(○:균등분포형, ×:전진형 5, □:자연형, *:중앙집중형)



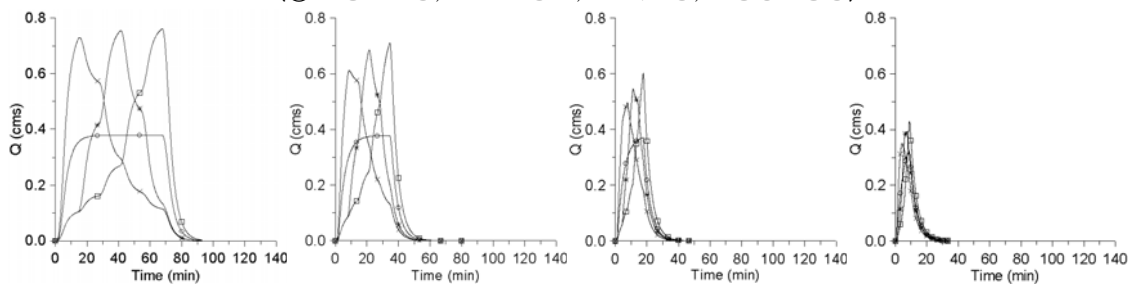
a) $V_r = 0.25$ b) $V_r = 0.5$ c) $V_r = 1.0$ d) $V_r = 2.0$

그림 12. 장방형 우비대칭유역의 수문곡선 비교(횡방향)
(○:균등분포형, ×:전진형 5, □:자연형, *:중앙집중형)



a) $V_r = 0.25$ b) $V_r = 0.5$ c) $V_r = 1.0$ d) $V_r = 2.0$

그림 13. 신장형 좌비대칭유역의 수문곡선 비교(횡방향)
(○:균등분포형, ×:전진형 5, □:자연형, *:중앙집중형)



a) $V_r = 0.25$ b) $V_r = 0.5$ c) $V_r = 1.0$ d) $V_r = 2.0$

그림 14. 신장형 우비대칭유역의 수문곡선 비교(횡방향)
(○:균등분포형, ×:전진형 5, □:자연형, *:중앙집중형)

표 3. 대칭유역과 비대칭유역의 첨두유량 비교 (횡방향) ; $Q_p(\text{cms})$ $T_p(\text{min})$

유역형상	강우 분포형	이동 속도	좌비대칭유역	대칭유역	우비대칭유역	Q_p 좌비대칭/대칭	T_p 우비대칭/대칭
정사각형	전진형	0.25	0.70561(17.93)	0.73615(17.00)	0.75785(17.00)	0.959	1.029
		0.5	0.65517(11.47)	0.68900(9.73)	0.73274(10.67)	0.951	1.063
		1.0	0.59041(7.52)	0.60488(6.95)	0.65331(6.03)	0.976	1.082
		2.0	0.44825(5.21)	0.50581(4.57)	0.51995(4.77)	0.886	1.028
	지연형	0.25	0.73343(67.93)	0.75623(68.80)	0.76918(69.40)	0.970	1.017
		0.5	0.70109(34.43)	0.73987(35.33)	0.76069(36.10)	0.948	1.028
		1.0	0.63381(17.53)	0.69925(18.35)	0.73361(19.18)	0.906	1.049
		2.0	0.48455(9.12)	0.56714(9.51)	0.59346(9.93)	0.854	1.046
	중앙 집중형	0.25	0.72111(42.33)	0.75161(42.67)	0.76685(43.06)	0.959	1.020
		0.5	0.67138(21.53)	0.77785(22.30)	0.75471(22.97)	0.863	0.970
		1.0	0.59365(12.97)	0.66629(11.78)	0.71448(12.57)	0.891	1.072
		2.0	0.48711(7.35)	0.53863(7.02)	0.56816(7.17)	0.904	1.055
신장형	전진형	0.25	0.71911(14.80)	0.72582(15.00)	0.72988(15.34)	0.991	1.006
		0.5	0.60262(9.57)	0.60550(9.13)	0.61150(8.67)	0.995	1.010
		1.0	0.48600(7.05)	0.49317(7.35)	0.49697(7.68)	0.985	1.008
		2.0	0.34314(4.61)	0.34765(4.21)	0.35095(4.27)	0.987	1.009
	지연형	0.25	0.75775(67.13)	0.76004(67.47)	0.76137(67.80)	0.997	1.002
		0.5	0.69595(33.83)	0.70512(34.20)	0.71018(34.53)	0.987	1.007
		1.0	0.57000(17.07)	0.59138(17.37)	0.60267(17.68)	0.964	1.019
		2.0	0.40305(6.93)	0.52362(8.93)	0.63019(9.09)	0.951	1.203
	중앙 집중형	0.25	0.74917(4.73)	0.75256(41.07)	0.75456(41.40)	0.995	1.003
		0.5	0.66585(21.03)	0.67768(21.10)	0.68477(21.47)	0.983	1.010
		1.0	0.53038(11.71)	0.53608(11.30)	0.54622(11.12)	0.989	1.019
		2.0	0.38761(6.93)	0.39128(3.09)	0.39229(7.26)	0.991	1.003
장방형	전진형	0.25	0.51392(41.60)	0.54659(37.67)	0.65689(34.67)	0.940	1.202
		0.5	0.44721(25.10)	0.53189(18.57)	0.69886(17.60)	0.841	1.314
		1.0	0.35960(16.75)	0.51130(10.88)	0.66654(10.87)	0.703	1.304
		2.0	0.24132(8.94)	0.45577(5.74)	0.50375(8.57)	0.529	1.105
	지연형	0.25	0.53387(68.00)	0.62131(71.67)	0.66858(75.27)	0.859	1.076
		0.5	0.48201(34.43)	0.64190(38.07)	0.73320(41.83)	0.751	1.142
		1.0	0.40447(17.52)	0.65493(20.85)	0.77447(24.17)	0.618	1.183
		2.0	0.27800(8.97)	0.52068(10.83)	0.52915(12.56)	0.534	1.016
	중앙 집중형	0.25	0.53928(54.73)	0.57971(51.40)	0.62906(56.67)	0.930	1.085
		0.5	0.47053(27.83)	0.59493(25.27)	0.72448(28.97)	0.791	1.218
		1.0	0.36517(14.20)	0.60802(14.23)	0.77282(17.50)	0.601	1.271
		2.0	0.24934(7.36)	0.50224(8.67)	0.53543(10.62)	0.496	1.066

유량보다 점차 작아지고 있다. 이것은 모든 유역형상과 모든 강우분포형에 관계없이 동일한 현상을 보인다. 신장형유역에서 우비대칭유역과 대칭유역의 첨두유량차이가 가장 작게 나타나며, 장방형유역에서 가장 큰 차이를 보여주고 있다. 모든 유역형상과 모든 강우분포형에서 좌비대칭유역과 비교하여 대칭유역의 첨두유량이 크게 나타나고 있는 반면에, 우비대칭의 경우는 이와 반대의 현

상을 보이고 있으며, 장방형에서 첨두유량의 차이(우비대칭과 대칭유역의 첨두유량의 차이)가 가장 크게 나타나며 신장형유역에서 그 차이가 가장 작다.

5. 결 론

본 논문에서는 신장형, 장방형 그리고 정사각형 비대칭 모형유역형상에 대하여 다양한 이동속도를

가진 강우가 유역내 하천의 상류방향, 하류방향, 횡방향으로 이동할 때 균등분포형, 전진형, 지연형, 중앙집중형 강우분포형에 따르는 유출수문곡선을 모의하여 그 특성을 비교분석하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 하류방향에서 대칭유역과 비대칭유역의 첨두유량을 비교해 보면 비대칭유역의 첨두유량은 이동속도가 느릴때는 대칭유역의 첨두유량과 큰 차이가 없으나 이동속도가 빠를수록 대칭유역의 첨두유량보다 점차 작아지고 있다. 3가지 유역형상에 대한 대칭과 비대칭유역의 첨두유량을 비교해 보면 신장형유역에서 그 차이가 가장 작은 반면에 장방향유역에서 가장 큰 차이를 보여주며, 이것은 상류방향에서도 마찬가지이다. 정4각형과 장방향유역에서는 전진형강우에서 대칭유역과 비대칭유역의 첨두유량에 대한 가장 큰 차이를 보이며, 지연형에서 가장 작은 차이를 보여준다.
- 2) 상류방향 이동강우의 경우는 정4사각형과 장방향유역에서 지연형강우의 첨두유량이 가장 크고 전진형강우의 첨두유량이 가장 작은 반면에 신장형유역에서는 중앙집중형강우의 첨두유량이 가장 크고 지연형에서 가장 작게 나타났다.
- 3) 횡방향에서는 대칭유역, 좌비대칭, 우비대칭 유역 모두 지연형강우에서 가장 큰 첨두유량을 그리고 전진형에서 가장 작은 첨두유량을 보이고 있다. 좌비대칭유역의 첨두유량은 이동속도가 느릴 때는 대칭유역의 첨두유량과 큰 차이가 없으나 이동속도가 빠를 때는 대칭유역의 첨두유량보다 점차 작아지고 있다. 이것은 모든 유역형상과 모든 강우분포형에 관계없이 동일한 현상을 보인다. 좌비대칭유역의 경우는 모든 유역형상과 모든 강우분포형에서 대칭유역의 첨두유량보다 작게 나타나고 있는 반면에, 우비대칭의 경우는 이와 반대의 현상을 보이고 있으며, 장방향에서 우비대칭과 대칭유역의 첨두유

량의 차이가 가장 크게 나타나며 신장형유역에서 그 차이가 가장 작게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

최계운, 강희경, 박용섭, GIS를 활용한 유역내 이동강우에 의한 유출특성 연구. 한국수자원학회 논문집, 제33권 제6호, pp. 793-804, 2000.

최계운, 이희승, 안상진, 분포형태모델을 이용한 유역내 이동강우의 유출해석. 한국수자원학회논문집, 제25권 제1호, pp. 101-109, 1992.

한건연, 전민우, 김지성, 유역형상에 따르는 이동강우의 유출영향분석 (1). 대한토목학회논문집, 제 26권 제 1B호, pp. 15-25, 2006.

de Lima, JLMP and Singh, V. P., The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow laboratory experiments under simulated rainfall. Water Resources publications, pp. 101-111, 1999.

de Lima, JLMP and Singh, V. P., Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow. Physics and Chemistry of the Earth, 28, pp. 277-282, 2003.

Lee, K. T. and Huang, J. K., Effect of moving storms on attainment of equilibrium discharge. Hydrol. Process., 11, pp. 3357-3366, 2007.

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

Ogden, F. L., Richardson, J. R. and Julien, P. Y., Similarity in catchment response, 2. Moving rainstorms. Water Resour. Resear.,

- Vol. 31(6), pp. 1543-1547, 1995.
- Richardson, J. R., The effect of moving rainstorms on overland flow using one-dimensional finiteelements. Ph.D. dissertation, Colorado State Univ., Colorado, 1989.
- Singh, V. P., Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph. Hydrol. Prosess., 11, pp. 1649-1669, 1997.
- Singh, V. P., Effect of the direction of storm movement on planar flow. Hydrol. Prosess., 12, pp. 147-170, 1998.
- Singh, V. P., Effect of the duration and direction of storm movement on planar flow with full and partial areal coverage. Hydrol. P16, pp. 3437-3466, 2002a.
- Singh, V. P., The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow. Advances in Water Resources, 25, pp. 817-828, 2002b.
- Surkan, A. J., Simulation of storm velocity effects of flow from distributed channel network. Water Resour. Resear., 10, pp. 1149-1160, 1974.
- Tabios, G. O., Obyesekera, J. T. B. and Shen, H.S., The influence of storm movement on the streamflow hydrograph through space-time rainfall generation and hydraulic routing. Colorado State Uni., Fort Collins, Colarado, 1998.