

논의 수문특성을 고려한 소유역의 유출곡선 합성

Runoff Hydrograph Synthesis from Small Watersheds Considering Hydrological Characteristics of Irrigated Rice Paddies

김 철 겸* · 박 승 우** · 임 상 준***
Kim, Chul Gyum · Park, Seung Woo · Im, Sang Jun

Abstract

The NRCS curve number (CN) method has been widely adopted in practice to synthesize runoff hydrographs from small watersheds with complex land use. It may not be valid to apply this model for irrigated paddies, since hydrological characteristics of irrigated rice paddies are not sufficiently considered in CN method. This paper attempts to extend the capability of the well-known SCS TR-20 model to local conditions by formulating a submodel for the runoff processes in paddies. The modified model was tested with field data from the Baran watershed. The results were in good agreement with field data. It was also applicable to simulate runoff changes resulting from land use changes within the watershed.

I. 서 론

농업 소유역의 많은 부분을 차지하고 있는 논 지역에 있어서, 강우시 유출은 담수심의 변화 및 물꼬 높이에 따른 일시 저류 효과를 가질 수 있으며, 배수로로 배제되는 유출 또한 물꼬를 통해 이루어지므로, 자연하천이나 산림지 등의 일반적인 유역의 경우와는 다른 유출 특성을 가지고 있다.

그러나, 기존의 홍수량 산정방법이나 수문 모형들은 유역 전체를 대상으로 홍수 유출량을 산정하거나 단위도 합성 등을 통하여 유출을 모의함으로써, 논 유출 특성에 대한 고려를 하지 않으며,

기존의 물수지를 이용한 논 유출 모형들은 적용성에 있어 포장단위에 한정되는 단점을 가지고 있다 (김채수, 1982; 정하우 등, 1986). 현재까지 논 유출 특성을 고려한 유역단위의 유출 모형에 대한 연구는 미비한 상태이며, 주로 토지이용에 따른 모형의 유출 매개변수 보정이나 (안상진 등, 1990; 角屋 睦, 1988), 물꼬 높이 및 담수심 변화의 관측을 통한 포장단위의 유출량 추정 등에 관한 연구가 되어 왔다 (김채수, 1982; 임상준 등, 1997).

따라서, 본 연구에서는 유역 홍수량 추정 모형인 TR-20 모형에 대하여 논에서의 저류 효과 및

* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부

** 서울대학교 농업생명과학대학

*** 서울대학교 대학원

키워드 : 유출수문곡선, 홍수량 추정, 관개논, 침투유량, 유출량

유출 특성을 나타낼 수 있도록 수정하였으며, 이를 우리나라의 농업 소유역에 적용하여 유출수문곡선을 추정하고, 실측 홍수량 자료가 있는 발안 지역을 대상유역으로 선정하여 적용결과를 비교하였으며, 논에서의 경작상태의 변화에 따른 유역의 유출량 변화로부터, 논 지역이 가지고 있는 홍수경감효과에 대해서 고찰하였다.

II. 유출수문곡선의 추정

1. TR-20 모형에 의한 유역 홍수량 추정

TR-20 모형에서는 소유역에서의 홍수유출량 산정시 SCS에서 제시한 유출곡선번호법과 무차원 단위도법을 이용하고 있다. 유출곡선번호법에 의한 유효우량은 다음의 식으로 정의된다 (SCS, 1972).

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, P 는 강수량 (mm), S 는 유역의 최대잠재보유수량 (mm), Q 는 직접유출량에 해당하는 유효우량 (mm)이다. 식(1)로부터 계산된 유효우량 Q 는 SCS의 무차원 단위도법을 이용한 단위도합성을 통하여 유출수문곡선을 생성하게 된다.

저수지의 홍수추적은 다음과 같은 저류방정식과 저수지 표고별 저류량 및 방류량 관계 자료를 이용하여, 저류지시법 (storage indication method)을 적용하고 있다 (SCS, 1972).

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, I 는 유입량 (m^3/s), O 는 유출량 (m^3/s), Δt 는 추적시간 간격이며, ΔS 는 Δt 동안 저류량 변화 (m^3)이다.

한편, 하도구간의 홍수추적은 선형 kinematic wave 방법의 하나인,凸추적법 (convex method)을 사용하여 다음과 같은 추적 모형으로 구성된다

(SCS, 1972).

$$Q_{s,t+\Delta t} = (1 - C_s)Q_{s,t} + C_s I_{s,t} \dots\dots\dots(3)$$

여기서, $Q_{s,t+\Delta t}$ 는 ($t + \Delta t$)시간에서의 하류지점의 유출량 (m^3/s), $Q_{s,t}$ 는 t 시간에서의 하류지점의 유출량 (m^3/s), $I_{s,t}$ 는 t 시간에서의 상류지점으로부터의 유입량 (m^3/s)이며, C_s 는 하도 홍수추적 계수 ($0 \leq C_s \leq 1$)이다.

2. 논을 유출 특성을 고려한 수정 TR-20 모형

논에서의 유출량은 담수심, 관개량, 강우량, 증발산량, 침투량 등을 고려한 물수지 방정식으로부터 계산할 수 있다. 일반적으로 홍수시에는 관개를 실시하지 않으며, 증발산량, 침투량 등의 인자들의 영향이 상대적으로 미소하므로, 본 연구에서는 이러한 인자들을 생략하였다. 또한, Fig. 1과 같이 여러 필지로 구성된 논을 하나의 광역 필지로 단순화시켜 적용하고, 강우에 따른 담수심의 시간적 변화와 논에서의 저류효과를 고려하여 홍수유출 모형을 구성하였다.

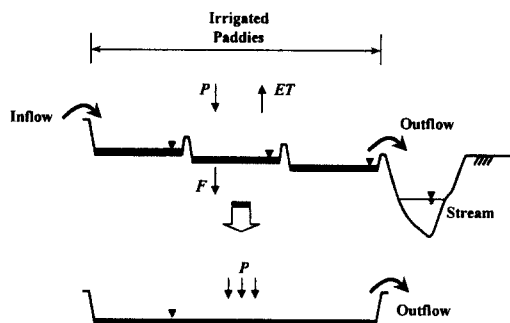


Fig. 1. Flood runoff in paddies

Fig. 2는 논에서의 유출 현상을 나타낸 것으로, H_b 는 두렁 높이를, H_i 는 물꼬 높이, FD 는 담수심을 나타낸다. Fig. 2에서 물꼬 높이 이하의 담수심에서는 유출이 없고 저류현상만 발생하며, 물꼬 높이 이상에서 두렁 높이까지는 폭 W 를 가지는

물꼬를 통하여 배수가 되며, 두렁 높이 이상일 때에는 전면 배수되는 것으로 모형을 구성하였다. 이 때, 물꼬를 통하여 배제되는 유출량은 다음과 같이 위어 (weir)의 자유낙하 유량공식을 적용하였다 (최진규, 1997).

$$Q_p = c_p W H_p^{3/2} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, Q_p 는 유출량 (m^3/s), c_p 는 유출부의 조건에 따라 달라지는 상수이며, W 는 물꼬의 폭 (m)을 나타내고, H_p 는 월류 수두 (m) ($=FD-H_i$)이다.

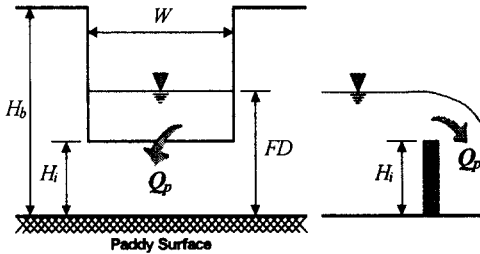


Fig. 2. Outline of runoff simulation model in paddies

즉, 다음과 같은 물수지 식을 이용하여 시간별 담수심 변화에 따른 유출을 모의하였다.

- i) $FD_t < H_i$ 이면, $Q_p = 0$
 - ii) $H_i \leq FD_t < H_b$ 이면, $Q_p = c_p W H_p^{3/2}$
 - iii) $FD \geq H_b$ 이면, $Q_p = 10 \times (PA \times P_t) / \Delta t$
- $$FD_t = FD_{t-1} + P_t - q_p \dots\dots\dots(5)$$

여기서, PA 는 논 면적 (ha), P_t 는 강우량 (mm), q_p 는 단위면적당 유출량 (mm)이다.

Ⅲ. 대상유역 및 수문자료

1. 대상유역

유출곡선을 추정하기 위하여 선정된 대상유역은 경기도 화성군 팔탄면과 봉담면에 위치한 발안유

역으로, 발안 및 기천저수지가 상류에 위치하고 있는 농업유역이다. 본 연구에서는 HP#6 유역 및 HP#7 유역의 강우-유출자료를 이용하여 유출 수문곡선의 추정 결과를 비교하였다.

HP#6 유역은 농업소유역으로 유역면적이 412.5ha이고, 유로장이 1,630m이며, 논이 전체 면적의 26.9%를 차지하고 있으며, 산림지가 54.8%를 이루고 있다. HP#7 유역은 상류에 저수지 유역인 HP#12과 농업소유역인 HP#13 유역이 위치하고 있으며, 하도구간의 홍수추적을 모의할 수 있는 유역으로서 전체 유역면적은 990.1ha이다. 소유역별 토지이용상태는 Table 1에 나타나 있다.

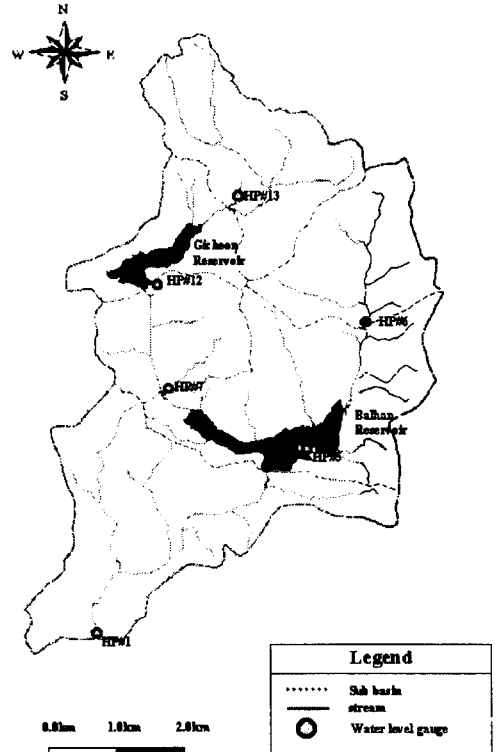


Fig. 3. The Baran watershed

2. 수문자료

강우량은 대상유역에 설치한 강우계의 시간별 자료를 이용하였으며, '96~'97년의 강우사상 중에

Table 1. Hydrologic characteristics of the Baran watershed

Water-shed	Area (ha)	Reach Length (m)	Land use (%)				
			Paddy	Upland	Forest	Reser-voir	Farm-steads
HP #6	412.5	1,630	26.9	15.0	54.8	0.0	3.3
HP #7	233.8	1,575	31.5	5.1	63.2	0.0	0.2
HP #12	250.0	2,250	9.5	6.7	66.8	16.6	0.4
HP #13	506.3	3,125	18.0	4.2	76.9	0.0	0.9

서 비교적 강우량이 많고, 유출량 자료가 있는 강우-유출자료를 선정하였다. HP #6 유역의 강우량 자료는 Table 2와 같이 10개로서 최소 33.5mm에서 최대 230.5mm의 범위를 보였으며, HP #7 유역은 Table 3과 같이 6개의 강우량 자료를 선정하였다.

3. 논 특성자료

강우시 논 지역의 담수심과 물꼬 높이는 '96년의 발안유역 여러 지구에 대한 실측 자료 및 물관리 관행으로부터 추정된 평균값을 적용하였으며, 식(4)에서 관개지구의 물꼬 폭을 나타내는 W (m)는 유역내의 논 면적과의 관계를 이용하여 다음의 식으로부터 추정하여 적용하였다.

$$W = \alpha \cdot (PA)^\beta \dots\dots\dots(6)$$

여기서, PA 는 유역내 논 면적 (ha)이며, α 와 β 는 보정 매개변수이다.

IV. 수정 TR-20 모형의 검증

강우사상별 침투유량과 침투시간, 총 유출량에 대하여 수정 TR-20 모형 및 기존 TR-20 모형에 의한 유출수문곡선의 추정 결과와 실측치를 비교하였다. Table 2는 HP #6 유역의 10개 강우-유출 사상에 대한 유출량, 침투유량, 침투시간 등을 비교한 것으로, 수정 TR-20 모형과 기존의 TR-20 모형으로부터 추정한 결과를 함께 나타내어 실측치와 비교하였다.

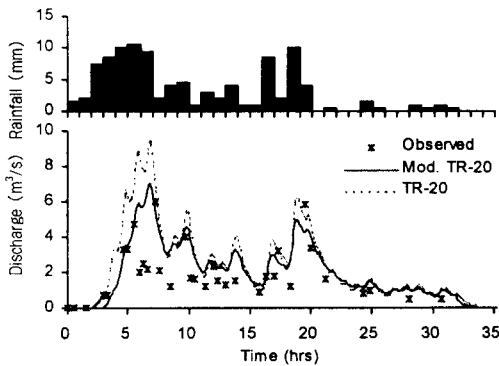
모형의 적합성 여부는 실측치와 추정치의 침투유량, 침투시간, 총 유출량의 RMSE (root mean square error), R^2 를 산정하여 검토하였다. 추정된 침투유량의 RMSE와 R^2 는 각각 2.955m³/s, 0.995로 나타났으며, 이는 기존 모형에 의한 5.374 m³/s, 0.979의 결과보다 좋은 추정 결과를 보였다. 침투시간의 경우에도 RMSE와 R^2 가 각각 0.4hr, 0.995

Table 2. Comparisons of observed and simulated runoff hydrograph at HP#6

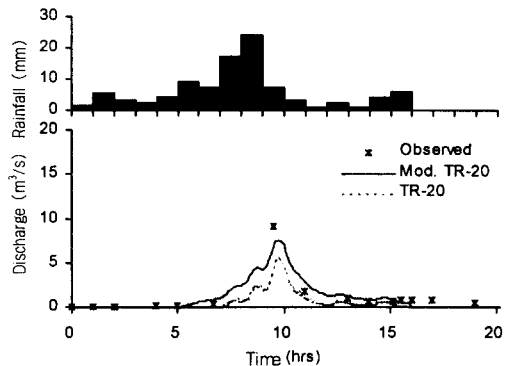
Date	Rainfall (mm)	Peak flow (m ³ /s)			Time to peak (h)			Runoff volume (10 ³ m ³)		
		Obs.	Sim.	TR-20	Obs.	Sim.	TR-20	Obs.	Sim.	TR-20
7/04/96	53.5	6.759	5.299	4.746	7.8	8.0	7.9	87.98	71.77	57.16
7/21/96	46.5	3.984	3.677	1.025	14.0	14.0	13.9	32.01	29.83	6.91
7/27/96	33.5	5.039	3.301	0.812	4.0	4.0	3.9	26.32	26.74	4.09
5/07/97	63.5	3.843	3.317	1.469	7.3	7.0	6.9	56.45	56.81	25.59
5/12/97	102.0	5.977	7.063	9.466	7.3	6.8	6.8	191.85	249.01	297.57
6/25/97	99.5	21.584	20.367	19.381	10.0	9.8	9.8	191.77	230.25	190.98
6/30/97	139.0	45.990	46.011	46.717	12.0	11.9	11.8	524.02	563.90	505.70
7/04/97	50.5	6.125	7.622	7.913	13.5	12.9	12.8	111.89	111.27	106.77
7/15/97	42.5	3.830	1.469	0.632	6.2	6.0	10.9	53.40	24.66	8.14
8/03/97	230.5	70.623	65.365	61.842	11.0	10.9	10.8	1015.82	759.94	652.30
RMSE			2.955	5.374		0.4	2.2		120.76	172.49
R^2			0.995	0.979		0.995	0.735		0.936	0.889

Table 3. Comparisons of observed and simulated runoff hydrograph at HP#7

Date	Rainfall (mm)	Peak flow (m ³ /s)			Time to peak (h)			Runoff volume (10 ³ m ³)		
		Obs.	Sim.	TR-20	Obs.	Sim.	TR-20	Obs.	Sim.	TR-20
7/04/96	53.5	3.587	2.724	2.621	7.5	7.8	7.7	124.96	37.22	26.46
7/15/96	39.0	1.277	1.213	0.097	6.7	6.7	6.7	30.28	14.37	0.48
7/21/96	46.5	1.908	2.447	0.343	14.3	14.0	13.7	46.22	19.03	2.13
7/27/96	33.5	1.900	2.223	0.284	4.0	4.0	3.7	107.16	17.34	1.11
6/25/97	99.5	9.200	7.579	5.364	9.5	9.8	9.7	118.78	82.71	37.41
6/30/97	139.0	18.320	20.106	25.179	12.0	11.8	11.7	547.43	230.12	538.93
RMSE			1.180	3.719		0.2	0.4		154.11	78.07
R ²			0.976	0.885		0.995	0.993		0.941	0.889



(a) HP #6, 97/5/12



(b) HP #7, 97/06/25

Fig. 4. Runoff hydrograph at the Baran watershed

로서, 기존 모형에 의한 2.2h, 0.735 보다 좋은 결과를 보였다. 또한, 유출량에 대한 실측치와 추정치의 RMSE는 120.76천m³이었으며, R²는 0.936이었다.

HP#7 유역의 모형 검증 결과는 Table 3에 나타나 있다. Table 3에서와 같이 수정 모형의 경우, 침투유량에 대한 RMSE는 1.18m³/s로 나타났으며, 침투시간의 RMSE는 0.2h이었다. 이는 기존 TR-20 모형에 의한 추정 결과인 3.719m³/s와 0.4hr와 비교하여, 본 연구의 결과가 실측치와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 또한, 총 유출량과 추정 유출량의 R²는 0.941로 나타났으며, 기존

모형에 의한 유출량의 R²는 0.889이었다.

Fig. 4는 발안유역의 추정 및 실측 유출수문곡선들을 그래프로 비교한 것이다. Fig. 4(a)는 HP#6 유역의 유출수문곡선을 실측치와 비교한 것이며, Fig. 4(b)는 HP#7 유역에 대한 추정 결과이다.

V. 경작상태에 따른 유출 변화

논벼의 경작상태에 따른 유출 변화를 알아보기 위하여, 경작지구와 비경작지구의 두 조건에 대하여, 수정 TR-20 모형을 적용하여 재현기간별 확

를 강우량에 따른 첨두유량을 추정하였다. 강우량은 수문기상대의 확률강우량 자료(건설부, 1988)를 이용하였으며, SCS의 24시간 강우분포형(SCS, 1972)을 이용하여 시간별 강우량을 모의하였다.

각 경우에 대한 조건은 早瀬吉雄(1994)의 연구에서와 같이, 경작지구의 경우는 배수가 되는 물꼬 높이를 60mm, 두렁의 높이는 300mm로 하였으며, 비경작지구에 대해서는 두렁의 붕괴로 인하여 두렁 높이 50mm, 물꼬 높이 10mm로 설정하였다. 이 때의 담수심은 각각 40mm와 0mm로 가정하였다.

Table 4는 강우분포형 II와 IA에 대하여 확률강

Table 4. Peak flow variations with cultivated condition

Return period (year)	Rainfall (mm)	Peak flow (m ³ /s)					
		SCS Rainfall type-II			SCS Rainfall type-IA		
		Culti-vating(a)	Non-Cultiv.(b)	(a/b)	Culti-vating(a)	Non-cultiv.(b)	(a/b)
2	140	38.146	45.947	0.83	13.175	13.532	0.97
5	205	65.680	75.164	0.87	23.812	23.976	0.99
10	250	85.201	95.688	0.89	31.351	35.066	0.89
50	340	124.788	136.857	0.91	46.618	51.029	0.91
100	380	142.486	155.132	0.92	53.438	58.137	0.92

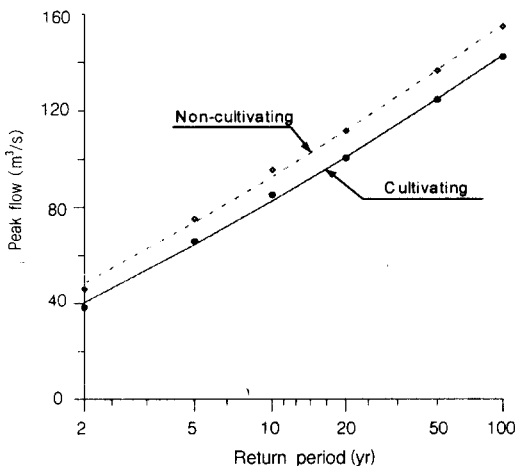


Fig. 5. Effects of land use changes on peak flow (Type II)

우량별 첨두유량을 나타낸 것으로, 비경작지구에 대한 경작지구의 첨두유량을 계산한 결과, 강우분포형-II에서는 0.83~0.92, IA에서는 0.89~0.99의 값을 보였다. Fig. 5는 강우분포형-II에 대한 재현기간별 첨두유량의 변화를 그림으로 표시한 것이다.

VI. 요약 및 결론

농업소유역은 논, 밭, 임야 등 복잡한 토지이용 특성을 보이고 있으며, 논, 밭의 경우에는 관개를 실시하여 일정 높이의 담수심을 유지하고 있다. 그러므로, 이러한 농업유역의 홍수유출량을 추정하기 위해서는 논에서의 유출 특성을 정확하게 모의하여야 한다. 본 연구에서는 논에서의 유출해석과정을 추가하여 TR-20 모형을 수정하였으며, 모형의 적합성 여부를 실측치와 비교하여 검증하였다. 유출수문곡선의 비교를 위하여, 농업유역인 발안유역의 강우-유출자료를 이용하여 첨두유량, 첨두시간, 총 유출량 등을 비교하였으며, 이로부터 현장 적용가능성을 평가하였다. 또한, 경작지구와 비경작지구에 대한 유출수문곡선을 비교함으로써, 토지이용특성의 변화에 따른 유출량의 변화를 모의하였다.

본 연구의 결과로부터 기존의 수문 모형에 대하여 논, 밭의 유출해석과정을 추가함으로써, 담수재배를 실시하는 논 지대의 유출 과정을 보다 정밀하게 해석할 수 있으며, 농업유역의 홍수량 및 유출수문곡선 추정에 대한 적용성도 높일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 건설부, 1988, 수자원관리기법개발연구조사보고서, 제2권 한국확률강우량도의 작성, 서울.
2. 김채수, 1982, 관개기간중 담유역에서의 강우 유출량 추정에 관한 연구, 동국대학교 석사학위 논문.
3. 김현영, 황철상, 강석만, 이광야, 1998, 논유출

- 특성을 고려한 홍수분석 시스템 개발, 한국관개배수, 5(1), pp. 8~19.
4. 안상진, 이종형, 1990, 토지이용의 변화와 홍수 유출 Model, 한국수문학회지, 23(1), pp. 24~31.
 5. 임상준, 박승우, 1997, 논이 유출곡선번호 추정, 한국수자원학회논문집, 30(4), pp. 379~387.
 6. 정하우, 박승우, 1986, 저수지 물관리 연구 (II), 농수산부, 농업진흥공사, pp. 245~306.
 7. 최진규, 김현영, 손재권, 1997, 논이 배수물꼬의 유량에 관한 기초연구, 한국농공학회지, 39(2) 39(2), pp. 134~142.
 8. 角屋 陸, 1988, 土地利用變化に伴う流出特性の變化, 農業土木學會誌, 56(11), pp. 5~9.
 9. 早瀬吉雄, 1994, 水田地帯の洪水防止・軽減機能の評価と機能向上事業の提案, 農業土木學會誌, 62(10), pp. 1~6.
 10. Soil Conservation Service, 1972, SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.