

논의 유출특성을 고려한 소유역의 홍수유출 변화 추정

Estimating the Variation of Peak Flow Considering the Runoff Characteristics in Paddies from Small Agricultural Watersheds

김철겸* · 박승우(서울대) · 임상준(서울대)

Kim, Chul Gyum · Park, Seung Woo · Im, Sang Jun

Abstract

A modified SCS TR-20 model that may be applied to a watershed having rice paddies as a land use type, was formulated and applied to a gauged watershed. The model was applied to the Balan watershed of 26 km² in size for estimating storm hydrographs. And the simulation results from the model were also compared with those from the SCS model. The results showed that paddy fields play an important role to reduce peak runoff. When fractions of paddies are left to fallow conditions or when rice crop is replaced by other, the peak runoff was found to increase up to 10 to 20 percent. The reduction rates in peak runoff appear to become greater for heavier storms or higher antecedent moisture conditions.

I. 서론

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 (김현영 등, 1998).

그러나, 아직까지 논 유출 특성을 고려한 유역 단위의 유출 모형에 대한 연구는 미비한 상태이며, 토지 이용에 따른 모형의 유출 매개변수 보정이나 (角屋 睦, 1988; 안상진 등, 1990), 물꼬 높이 및 담수심 변화의 관측을 통한 포장 단위의 유출량 추정 등의 연구가 진행되어 왔다 (김채수, 1982; 임상준 등, 1997).

본 연구에서는 농업유역 홍수추적 모형인 SCS TR-20 모형을 수정하여 논 유출 특성을 고려한 유역 단위의 홍수유출 모형을 구성하였으며, 구성된 모형의 적용성을 검토하고, 나아가 검토된 모형을 바탕으로, 논 경작상태의 변화, 토지이용 상태의 변화에 따른 유역의 유출량 변화로부터, 논 지역이 가지고 있는 홍수경감효과에 대해서 고찰하였다.

II. 유출수문곡선의 추정

2.1 유역 홍수량 추정

소유역에서의 홍수유출량 산정을 위하여, SCS에서 제시한 유출곡선번호법과 무차원단위도법을 이용하였다. 유출곡선번호법에 의한 유효우량은 SCS에서 다음의 식으로 정의하였다 (SCS, 1972).

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

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

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

하도구간의 홍수추적은 선형 Kinematic wave 방법의 하나인,凸추적법 (convex method)을 사용하여 다음과 같은 추적 모형을 구성하였다 (SCS, 1972).

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

2.2 논에서의 유출해석

논에서의 담수심은 관개량, 강우량, 배수량, 증발산량, 침투량 등을 고려한 물수지 방정식으로부터 계산할 수 있다. 그러나, 광역의 논 지역에 대하여 홍수시의 유출을 모의할 경우에는, 대부분의 경우 관개가 이루어지지 않으며, 증발산량, 침투량 등의 인자들의 영향이 상대적으로 미소하므로, 본 연구에서는 이러한 인자들을 생략하는 한편, 여러 필지로 구성된 논 지역을 단일의 광역필지로 가정하고, 강우에 따른 담수심의 시간적 변화와 논에서의 저류효과를 고려하여 홍수유출 모형을 구성하였다.

그림 1은 논에서의 유출 현상을 나타낸 것으로, H_b 는 두렁 높이를, H_i 는 물꼬 높이를, FD 는 담수심을 나타낸다. 즉, 물꼬 높이 이하의 담수심에서는 유출이 없고 저류 현상만 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 배수로로 배제되는 유출량은 다음과 같이 위어 (weir)의 자유낙하 유량공식을 적용하였다.

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

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

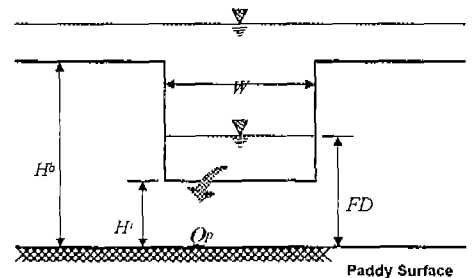


그림 1. 논에서의 유출 모형의 개요

III. 대상유역 및 수문자료

3.1 대상유역

본 연구에서 선정한 대상유역은 경기도 화성군 봉담면과 팔탄면에 위치한 발안유역으로, 발안 및 기천저수지가 위치하고 있으며, 그림 2와 같이 HS#1~HS#6의 6개 소유역으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 농업 소유역인 HS#3 유역과 소유역, 저수지 및 하도 구간으로 이루어져 있는 HS#4 유역을 이용하여 유출수문곡선을 비교하였다.

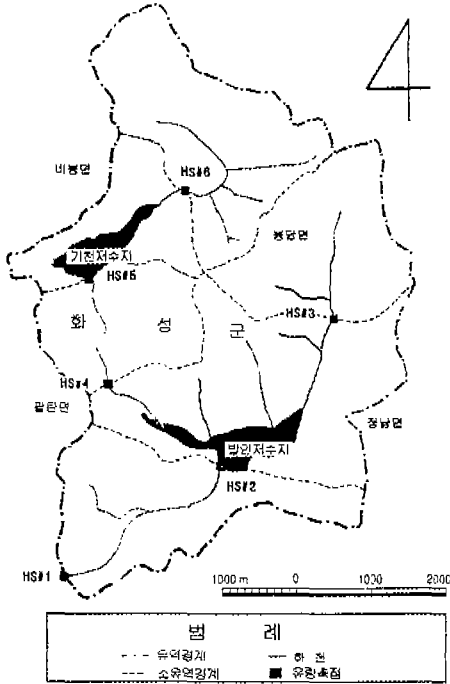


그림 2. 대상유역의 수문관측망도

HS#3 유역은 유역면적이 412.5 ha이고, 유로장이 1,630 m인 소유역으로, 논이 전체 면적의 26.9 %를 차지하고 있으며, 산림지가 54.8 %를 이루고 있다. HS#4 유역은 상류에 HS#5, HS#6 유역이 위치하고 있으며, 전체 유역면적은 990.1 ha이며, 소유역별 토지이용상태는 표 1과 같다.

표 1. 대상유역의 지상인자

유역명	유역면적 (ha)	유로장 (m)	토지이용상태 (%)				
			논	밭	산림	저수지	기타
HS#3	412.5	1,630	26.9	15.0	54.8	0.0	3.3
HS#4	233.8	1,575	31.5	5.1	63.2	0.0	0.2
HS#5	250.0	2,250	9.5	6.7	66.8	16.6	0.4
HS#6	506.3	3,125	18.0	4.2	76.9	0.0	0.9

3.2 수문자료

강우량은 대상유역에 설치한 강우계의 시간별 자료를 이용하였으며, '96~'97년의 강우사상 중에서 비교적 강우량이 많고, 동일기간에 대한 유출량 자료가 있는 11개의 강우-유출자료를 선정하였다. 선정된 강우자료는 최소 33.5 mm에서 최대 230.5 mm의 범위를 가지고 있다.

3.3 논 특성자료

배수량 계산에 이용되는 식(4)의 C_p 는 유출부의 특성을 고려하여 1.8로 가정하여 사용하였고, W 는 실측자료로부터 보정하여 산정하였다. 또한, 담수심 및 물꼬 높이는 '96년의 실측 자료를 평균하여 적용하였다.

관개지구의 평균 물꼬 폭을 나타내는 W 는 유역내의 논 면적과 관계있을 것으로 가정하여, 다음의 식을 이용하여 추정하였다.

$$W = \alpha \cdot (PA)^\beta \tag{5}$$

여기서, PA 는 유역의 논 면적 (km^2)이며, α 와 β 는 보정 매개변수이다.

IV. 모형의 적용

논의 수문특성을 고려하여 유출수문곡선을 추정한 결과는 표 2, 3과 같다. 표 2는 HS#3 유역의 10개 강우-유출사상에 대한 유출량, 침투유량, 침투시간 등을 비교한 것이다. 또한, 표 2에는 기존의 TR-20 모형으로부터 추정한 결과를 함께 비교하여 나타내었다.

유출수문곡선의 비교는 RMSE (root mean square error)와 R^2 를 이용하였다. 침투유량에 대한 추정치의 RMSE와 R^2 는 각각 $2.955 \text{ m}^3/\text{s}$, 0.9949 로 나타났으며, 이는 TR-20 모형에 의한 $5.374 \text{ m}^3/\text{s}$, 0.9794 의 결과보다 좋은 추정 결과를 보였다. 침투시간의 경우에도 RMSE와 R^2 가 각각 0.4 hr , 0.9947 로서, TR-20 모형에 의한 2.2 hr , 0.7351 보다 좋은 결과를 보였다. 또한, 유출량에 대한 실측치와 추정치의 RMSE는 120.76 m^3 이었으며, R^2 는 0.9358 이었다.

표 2. HS#3 유역의 유출수문곡선 비교

시간	강우량 (mm)	침투유량 (m^3/s)			침투시간 (ha)			유출량 (10^3m^3)		
		실측	추정	TR-20	실측	추정	TR-20	실측	추정	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	-	-	0.9949	0.9794	-	0.9947	0.7351	-	0.9358	0.8894

HS#4 유역의 유출수문곡선의 추정결과는 표 3에 나타나 있다.

표 3. HS#4 유역의 유출수문곡선 비교

시간	강우량 (mm)	침투유량 (m^3/s)			침투시간 (ha)			유출량 (10^3m^3)		
		실측	추정	TR-20	실측	추정	TR-20	실측	추정	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	-	-	0.9757	0.8852	-	0.9953	0.9932	-	0.9411	0.8893

V. 모형의 응용

5.1 경작상태에 따른 유출 변화

논에서의 경작상태에 따른 유출 변화를 알아보기 위하여, 벼 재배와 휴경상태의 두 경우에 대하여, 재현기간별 확률강우량에 따른 침투유량을 모형을 통하여 추정하였다.

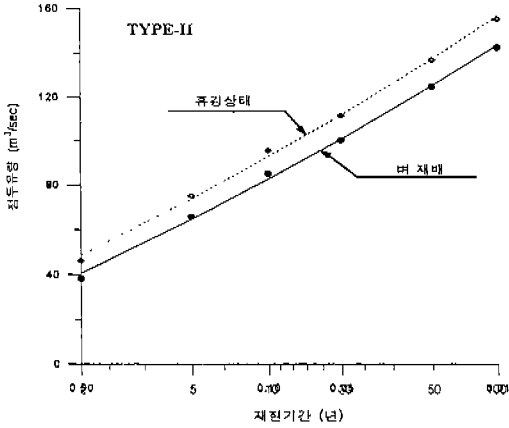


그림 3. 경작상태에 따른 침투유량의 변화 (Type-II)

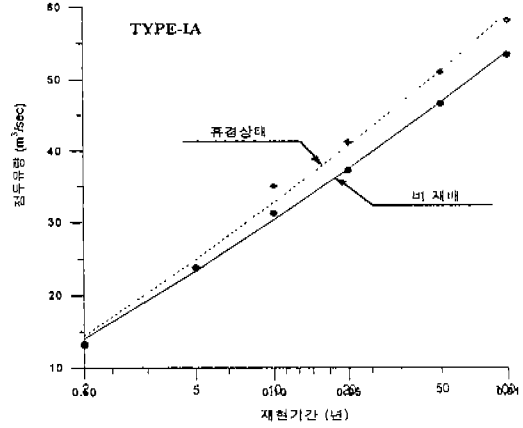


그림 4. 경작상태에 따른 침투유량의 변화 (Type-IA)

5.2 토지이용에 따른 유출 변화

HS#3 구역에 대하여, 현재 논으로 되어 있는 약 111 ha의 면적이 밭으로 전환되었을 경우의 침투유량의 변화에 대하여 살펴보았다.

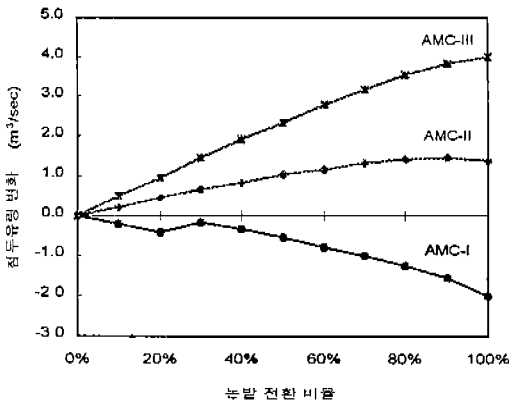


그림 5. 논밭 전환에 따른 침투유량 변화 (2년 빈도)

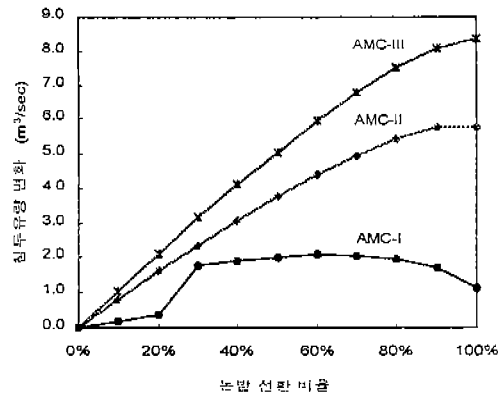


그림 6. 논밭 전환에 따른 침투유량 변화 (100년 빈도)

VI. 요약 및 결론

연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 논 유출 특성을 고려하여 SCS TR-20 모형을 수정하였으며, 수정된 모형이 기존의 모형 보다 침투유량, 침투시간, 유출량 모두 높은 적용성을 보였다.
2. 논에서의 경작상태에 따른 유출 비교 결과, 경작중인 경우 경작을 중지했을 때보다, 침투유량 감소효과를 보였고, SCS 강우분포형별로는 II, I, IA의 순으로 침투유량의 감소를 보였으며, 재현기간이 길수록 감소효과가 크게 나타났다.
3. 논밭 전환에 따른 유출 비교 결과, 전환비율에 따라 AMC-II, III의 경우 침투유량이 증가 경향을 보였고, AMC-I의 경우는 감소 경향을 보였다. 완전 전환되었을 경우, 100년 빈도 확률강우량의 AMC-III 조건에서 침투유량이 최대 8.4 m³/sec의 증가를 보였으며, 2년 빈도 확률강우량의 AMC-I 조건에서 최대 2.0 m³/sec의 감소를 보였다.

이상의 결과로부터, 논에서의 홍수경감효과는, 경작중인 논인 경우, 경작중지 상태 및 밭 상태에 비하여 10~20 % 정도의 침투유량 감소효과를 가져올 수 있으며, 강우량이 많을수록, 토양의 수분함유량이 많을수록 그 효과는 더 커질 것으로 판단된다. 반대로, 강우량이 적은 경우, 그리고 토양의 수분함유 정도가 낮은 경우에는 토양 침투의 영향으로 오히려 논보다는 밭 지역에서 홍수경감효과가 클 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 건설부, 1988. 수자원관리기법개발연구조사보고서, 제2권 한국확률강우량도의 작성.
2. 김채수, 1982. 관개기간중 답유역에서의 강우유출량 추정에 관한 연구, 석사학위 논문, 동국대학교.
3. 김현영, 황철상, 강석만, 이광야, 1998. 논유출 특성을 고려한 홍수분석 시스템 개발, 한국관개배수, 5(1), pp. 8-19.
4. 안상진, 이종형, 1990. 토지이용의 변화와 홍수유출 Model, 한국수문학회지, 23(1), pp. 24-31.
5. 임상준, 박승우, 1997. 논인 유출곡선번호 추정, 한국수자원학회논문집, 30(4), pp. 379-387.
6. 角屋 睦, 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.
7. 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.
8. Soil Conservation Service, 1972. SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.