

관개논과 산림유역의 홍수유출 특성 비교

A Comparative Study of Storm Runoff Characteristics for Irrigated Paddy Fields and Forest Watershed

임 상 준* · 박 승 우** · 강 문 성***

Im, Sang Jun · Park, Seung Woo · Kang, Moon Seong

Abstract

Rainfall and runoff data from a forested watershed and irrigated rice paddies at the Bal-an experimental watershed were monitored and analyzed to investigate the variations of runoff characteristics with different land use. The comparisons were conducted fourteen storm events ranging 21.8~190.2 mm of rainfall. Field data showed that direct runoff from paddies and forested watershed are not significantly different in volume. The peak discharge from forest watershed was less than that from paddies for lighter storms, but became greater for heavier storms. The peak runoff from the forest watershed was 39 percent greater than from the paddies. The results demonstrate that paddies play an important role to reduce peak discharge from heavy storms as compared to forest.

Keywords : Storm runoff, Irrigated paddy fields, Runoff characteristics, Peak runoff

I. 서 론

우리 나라의 논 면적은 1999년 현재 1,152천 ha로서 전체 국토면적의 11.6%를 차지하고 있다. 이제까지 논은 식량안보적 차원에서 단순하게 농산물을 제공해주는 것으로 인식되어 왔으나, 이밖에도 홍수를 조절하거나 수자원을 함양하는 등 공익

적 기능을 가지고 있다. 이러한 논의 공익적 기능에 대한 평가는 주로 경제학자들에 의해 사회과학적 접근방법으로 시도되어 왔으며(전영혜, 2000; 엄기철 등; 1993), 이에 대한 농공학이나 수공학 분야에서의 연구는 부족한 실정므로, 관개논의 강우-유출 관계에 근거한 수문학적 접근방법이 요구되고 있다.

강우-유출 관계는 토지이용에 따라 서로 다르게 나타나고 있다. 산림지나 밭의 경우에는 식물의 줄기나 잎에 의한 강우의 차단손실이 발생하고, 지면에 도달한 강우는 토양수분을 보충하며 토양의 저류능을 초과하는 강우성분은 다시 하류로 유출된다. 그러나 관개논의 경우에는 테라스의 형태로 이

* Virginia Polytechnic Institute and State University, Visiting Scholar

** 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 교수

***서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 신진연구원

* Corresponding author. Tel.: +01-540-231-2083

E-mail address: saim@vt.edu

루어져 있기 때문에 산림지와는 달리 논둑과 물꼬에 의해 강우량이 저장되고, 강우에 의해 증가된 담수심이 물꼬보다 높아지게 되면 물꼬를 월류하여 배수로로 유출된다.

일반적으로 관개논은 담수로 인한 침투량의 감소와 물꼬에 의한 저류 기능을 모두 가지고 있기 때문에 다른 토지이용 상태와 비교하여 복잡한 유출 기작을 보이고 있다. 佐藤晃一(1996)는 일본의 산림유역과 관개논의 유출량을 비교한 결과, 관개논 지구가 산림지보다 침투유출시간이 더 빠르며, 침투유출도 크게 발생하는 데, 이는 관개논의 낮은 침투율에 의한 것이다. 이와는 반대로 中村好男 등(1994)은 도시화로 인하여 관개논이 감소하고 있는 지구에 대하여 배수펌프장의 배수량을 분석한 결과, 관개논의 감소로 인하여 배수량은 3~4배 증가하고 있으며, 배수장의 펌프 가동시간도 매년 증가하고 있는 것으로 나타났다. 최근에 이르러 관개논의 유출특성에 관한 국내 연구는 많이 이루어지고 있으나(임상준과 박승우, 1997; 최진규 등, 1999; 김철겸 등, 2000), 주로 관개논의 강우-유출 관계를 분석하고 있으며, 관개논과 다른 토지이용 상태에 대한 비교는 거의 없는 실정이다.

토지이용에 따른 강우-유출 관계를 해석하기 위해서는 현장에서 계측된 실측자료를 이용하는 유역시험과 강우-유출 관계를 모의할 수 있는 도구, 즉 수학적 모델을 이용하여 비교하는 방법이 있다. 유역시험은 다시 단일 유역시험(single-catchment experiment)와 복합 유역시험(pair-catchment experiment)으로 구분할 수 있다. 단일 유역시험은 하나의 유역을 대상으로 토지이용의 변화가 발생하기 전과 후의 강우-유출 자료를 조사하여 토지이용의 변화로 인한 수문환경의 영향 정도를 평가하는 방법이며, 복합 유역시험은 동일한 기상조건에서 서로 다른 토지이용을 가지고 있는 두 개의 유역으로부터 강우-유출 자료를 조사하여 토지이용에 따른 수문환경의 변화를 평가하는 방법이다. 단일 유역시험은 토지이용의 변화가 발생하기 전과

후의 기상조건이 서로 상이하기 때문에 토지이용에 따른 효과를 정확하게 분석하기 어려우며, 복합 유역시험의 경우에는 기상조건이 동일하여 평가의 정확성은 높일 수 있으나, 유역의 운영 및 관리비용이 많아지는 단점 등이 있다(Maidment; 1996).

우리나라의 경우에 관개논의 유출특성을 평가하기 위해서는 기상학적으로 인접한 다른 유역의 유출량 자료를 수집하여 비교하는 복합 유역시험이 더 효과적이다. 즉, 두 개의 인접한 유역에 대한 강우-유출량 자료를 수집하고, 이로부터 토지이용에 따른 효과를 분석함으로써 관개논이 가지는 수자원적 기능을 계량화할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 서로 인접한 산림유역과 관개논의 복합 유역시험을 실시하여 강우량과 유출 자료를 수집하고, 직접유출량과 침투유출량을 비교함으로써 토지이용에 따른 홍수유출 특성을 비교하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지구

토지이용에 따른 유출특성 변화를 분석하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 서로 인접한 산림유역과 관개논 유역을 선정하여, 복합유역시험을 실시하였다. 선정된 시험유역은 경기도 화성군 발안면에 위치한 곳으로, 두 개의 유역 출구점의 직선거리는 300 m 이내로 매우 인접하게 위치하고 있으며, 이에 따라 동일한 기상조건을 적용하였다. 산림유역(HP#8)의 유역면적은 28.7ha이며, 유역 평균경사는 0.2%이고, 상수리나무와 리기테다 소나무(박승우, 2000)가 주종을 이루고 있으며, 토양은 자갈이 있는 양토(오산)로 구성되어 있다. 관개논 유역(HP#9)의 전체 면적은 2.7ha이고, 상류에 위치하고 있는 기천저수지의 용수간선으로부터 관개량을 공급받고 있으며, 포장에서 배출되는 배수량은 중앙에 위치하고 있는 배수로를 통하여 하천

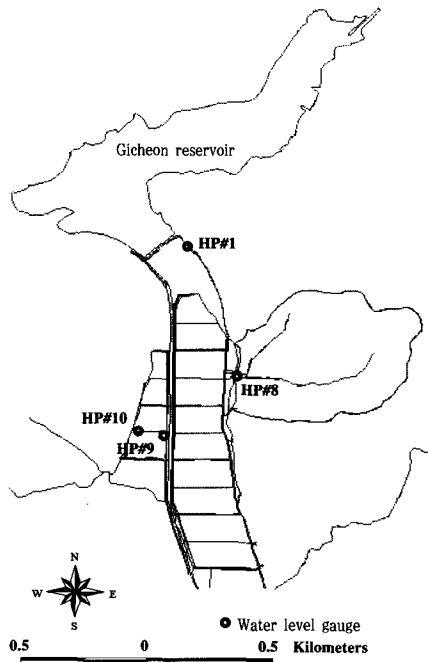


Fig. 1 Locations and monitoring networks in study area

Table 1 Hydrological characteristics of the paired watershed

Landuse	Watershed	Watershed area	Soil type	Data used
Forest	HP #8	28.7 ha	Jisan (loam)	1999-2000
Irrigated paddy	HP #9	2.7 ha	Osan (Sandy Loam)	

으로 유출된다. 관개논의 물관리방식을 조사하기 위하여 담수심과 물꼬높이를 시기별로 조사 분석한 결과, 본 지구의 물관리는 물꼬관리에 의해 이루어지고 있었다(박승우, 2000). 또한, 관개논은 상류에 용수간선이 위치하고 있기 때문에 상류의 배후 유역으로부터 유입되는 유출량이 없는 폐쇄적인 유역형태를 이루고 있어 관개논의 유출해석에 매우 적합한 곳이다. Table 1은 대상지구의 유역 특성과 현황을 나타내고 있다.

2. 수문 자료

강우량 자료는 유역으로부터 약 2.5 km 남쪽에 위치한 자기강우계의 시간별 강우량 자료를 이용하였다. 자기강우계는 팔탄면사무소에 설치되어 있으며, bucketing type (CASELLA)으로 0.2 mm 단위의 강우량을 측정하여 기록하고 있다.

산림소유역의 유역말단부와 관개논의 배수로에는 압력식 수위계(WL 14 Global water level logger)를 각각 설치하여 20분 간격의 수위자료를 수집하였으며, 현장의 유속 측정에 의한 수위-유량 관계식을 이용하여 시간별 유출량을 조사하였다.

3. 기저유량 분리

기저유량의 분리는 경사급변점법을 사용하였다. 경사급변점법은 Barnes(1939)에 의해 제안된 방법으로, 수문곡선의 감수부에서 유량을 반대수지에 나타내면 3개의 직선으로 구성되게 되는 데, 첫 번째 직선이 지표면 유출을 나타내고, 두 번째 직선이 중간유출을 의미한다. 따라서, 직선에 의해 구분되는 두 번째 변곡점까지의 유량이 직접유출량에 해당하게 된다. 이러한 분리방법은 분석자에 따라 차이가 크지만 홍수수문곡선을 분리하는데 많이 이용되고 있다(Anderson and Burt, 1980).

Ⅲ. 연구결과 및 분석

1. 강우-유출량 자료

관개논과 산림유역의 유출 특성을 비교하기 위하여 Table 2와 같이 14개의 강우-유출량 자료를 선정하여 직접유출량 및 첨두유출량을 비교하였다. 강우-유출량 자료는 1999~2000년의 2개년 동안 동일한 강우에 대한 산림유역과 관개논의 유출량 자료가 모두 있는 경우에 한하여 선정하였다. Table 2에서와 같이 선정된 강우자료는 21.8~

Table 2 Summary of rainfall-runoff data of the paired watershed

Event	Date	Rainfall (mm)	AP ₅ ¹⁾ (mm)	Runoff (mm)		Peak discharge (m ³ /s/ha)	
				Paddy	Forest	Paddy	Forest
S990709	7/9/99	49.0	13.4	8.12	4.08	0.0023	0.0008
S990722	7/22/99	24.2	31.0	3.72	2.49	0.0037	0.0006
S990728	7/28/99	88.3	1.2	37.65	53.46	0.0041	0.0079
S990801	8/1/99	49.8	131.4	10.71	23.88	0.0061	0.0128
S990802	8/2/99	190.2	58.6	94.24	97.49	0.0065	0.0053
S990803	8/3/99	61.2	250.8	49.41	36.52	0.0074	0.0111
S990905	9/5/99	49.4	0.0	24.96	6.22	0.0085	0.0100
S990909	9/9/99	21.8	4.8	6.21	1.09	0.0087	0.0130
S000804	8/4/00	52.4	1.8	25.89	15.74	0.0096	0.0079
S000820	8/20/00	83.8	17.2	38.29	24.02	0.0107	0.0105
S000825	8/25/00	65.1	137.6	44.04	55.27	0.0145	0.0231
S000831	8/31/00	29.5	111.6	9.03	8.12	0.0152	0.0236
S000914	9/14/00	38.0	8.0	6.54	1.13	0.0174	0.0305
S000915	9/15/00	152.8	45.8	73.76	80.15	0.0200	0.0182

1) 5-day antecedent precipitation

190.2 mm의 범위를 가지고 있으며, 5일 선행강우량은 0~250.8 mm의 범위를 보이고 있다. 산림유역의 직접유출량은 1.09~97.49 mm의 범위를 보이고 있으며, 관개논의 경우에는 3.72~94.24 mm의 범위를 가지고 있다.

한편, 첨두유량은 단위면적당 첨두유출량으로 환산하여 비교하였다. 관개논의 첨두유량은 S000915 강우사상에 대하여 최대값인 0.02 m³/s/ha를 나타내었으며, 산림유역은 S000914 강우사상의 0.0305 m³/s/ha가 최대이었다.

2. 시기별 홍수유출 특성 비교

산림유역의 유출은 주로 토양수분에 의해 결정되지만 관개논의 경우에는 강우가 발생하기 이전의 담수심 및 물꼬높이에 따라 좌우된다. 이러한 담수심과 물꼬높이는 논벼의 재배를 위해 경작자에 의해 인위적으로 조절되는 것으로, 논벼의 생육단계에 따라 시기적으로 변화한다. 본 연구에서는 시기별 담수심 및 물꼬높이의 변화가 직접유출량 및 첨

두유량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 아래의 식과 같이 관개논에 대한 상대오차(relative bias, RB)를 계산하였다.

$$RB_{runoff\ volume}(\%) = \frac{Q_{forest} - Q_{paddy}}{Q_{paddy}} \times 100 \dots (1)$$

$$RB_{peak\ discharge}(\%) = \frac{Qp_{forest} - Qp_{paddy}}{Qp_{paddy}} \times 100 \dots (2)$$

여기서, Q=직접유출량(mm), Qp=첨두유량(m³/s/ha)이고, 아래첨자 forest, paddy는 각각 산림유역과 관개논 지구를 의미한다.

Fig. 3은 산림유역과 관개논의 직접유출량 및 첨두유량의 상대오차를 계산하여 시기별로 비교한 것이다. 직접유출량의 경우 Fig. 2(a)와 같이 시기별로 유사한 경향을 보이고 있으나, 첨두유량의 경우에는 8월에 산림유역이 관개논보다 79% 정도 크게 나타나고 있으며, 9월에는 관개논이 산림유역보다 55% 정도 첨두유량이 크게 나타났다. 이는 물꼬관리에 의한 것으로 8월에는 깊은 담수심을 유지

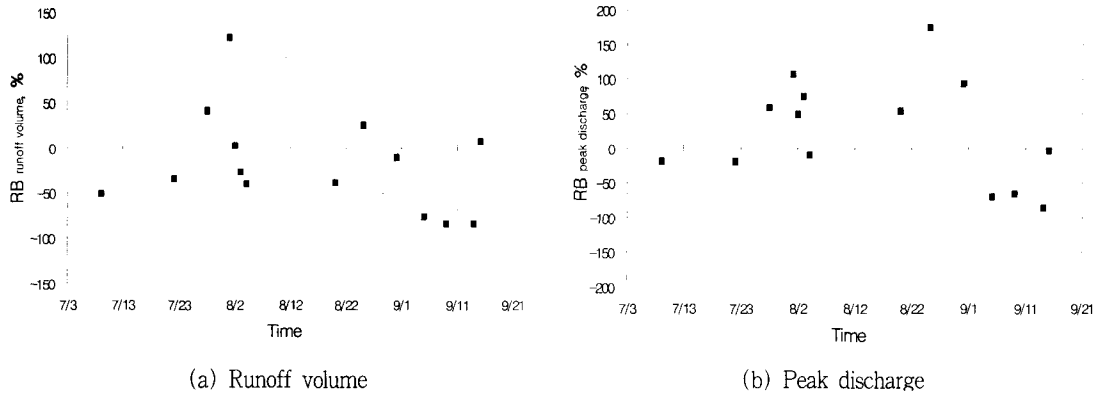


Fig. 2 Relative bias variations of runoff volume and peak runoff discharge between paddy field and forest watershed during July-August

하기 위하여 물꼬를 상대적으로 높게 유지하며, 9 월에는 물꼬를 낮게 관리하기 때문이다(박승우, 2000).

3. 강우량의 크기에 따른 비교

Fig. 3은 강우량의 크기에 따라 직접유출량 및 침투유출량의 상대오차(RB)를 식(1)과 (2)로부터 계산하여 비교한 것이다. 직접유출량의 경우 Fig. 3(a)와 같이 강우량의 크기에 따라 서로 상이한 결과를 보이고 있다. 즉, 강우량의 크기가 60 mm

이하에서는 관개논의 직접유출량이 산림유역보다 30% 정도 많게 나타나고 있으며, 60 mm 이상의 강우에서는 산림유역이 조금 많게 나타나고 있다. 이는 산림유역의 초기손실량이 담수상태의 관개논 보다 크기 때문에 상대적으로 작은 강우량에서는 관개논의 유출량이 크게 나타나며, 강우량이 많아 지게 되면 관개논의 논둑과 물꼬에 의한 저류작용이 발생하여 산림지의 유출량이 관개논보다 많아지 기 때문이다(佐藤晃一, 1996).

침투유출량의 경우는 Fig. 3(b)와 같이 산림유역이 관개논보다 대체적으로 크게 나타나고 있다. 60

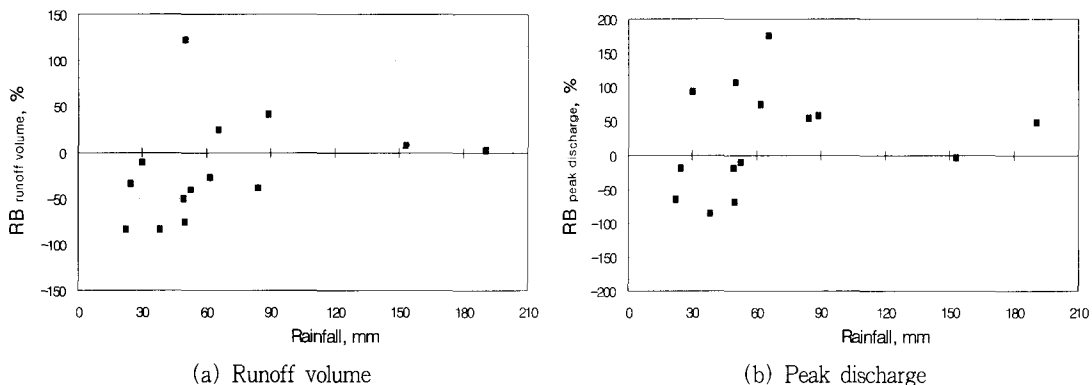


Fig. 3 Relative bias variations of runoff volume and peak discharge between paddy field and forest watershed according to rainfall amounts

mm보다 작은 강우에서는 산림유역이 관개논 보다 8% 정도 작은 반면에, 강우량의 크기가 60~90 mm에서 92% 정도 크게 나타나고 있으며, 강우량이 증가할수록 침투유량의 차이는 다시 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이는 60~90 mm의 강우에 대하여 논둑의 저류기능을 최대가 되며, 강우량이 어느 정도 증가하면 논둑의 저류기능을 초과하여 저류로 인한 홍수조절 효과는 상대적으로 줄어들게 되는 것을 알 수 있다.

4. 선형회귀분석

토지이용에 따른 홍수유출량의 변화를 살펴보기 위하여 관개논과 산림유역의 직접유출량 및 침투유량에 대하여 선형회귀분석을 실시하였다. 선형회귀분석은 서로 다른 토지이용이 수문·수질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 일반적으로 많이 이용되고 있는 방법이다(Cooke 등, 1995).

복합 유역의 14개의 강우-유출량 자료를 이용하여 직접유출량 및 침투유량에 대한 직선회귀식을

추정하였으며, 그 결과는 아래의 식(4)와 같다.

(a) 직접유출량

$$Q_{forest} = -3.79 + 1.07 \times Q_{paddy} \quad (R^2 = 0.889)$$

(b) 침투유량

$$Qp_{forest} = -0.001 + 1.39 \times Qp_{paddy} \quad (R^2 = 0.736)$$

.....(4)

직접유출량의 회귀관계식의 결정계수는 0.889이며, 침투유량의 회귀관계식은 결정계수가 0.736으로 나타났으며, 두 관계식에 대한 분산분석을 실시한 결과, 모두 유의성(p<0.001)이 인정되었다.

회귀관계식에 산림유역의 직접유출량은 관개논에 비하여 조금 증가하고 있으나, 그 차이는 7% 정도로 매우 적었으며, 침투유량은 산림유역이 관개논보다 39% 정도 크게 나타났다.

강우량의 크기에 따라서는 차이가 있으나, 전체 강우에 대하여 직접유출량을 비교하면 산림유역과 관개논이 매우 유사하였고, 침투유량에 대해서는 관개논이 산림유역보다 적게 나타났으며, 이로부터

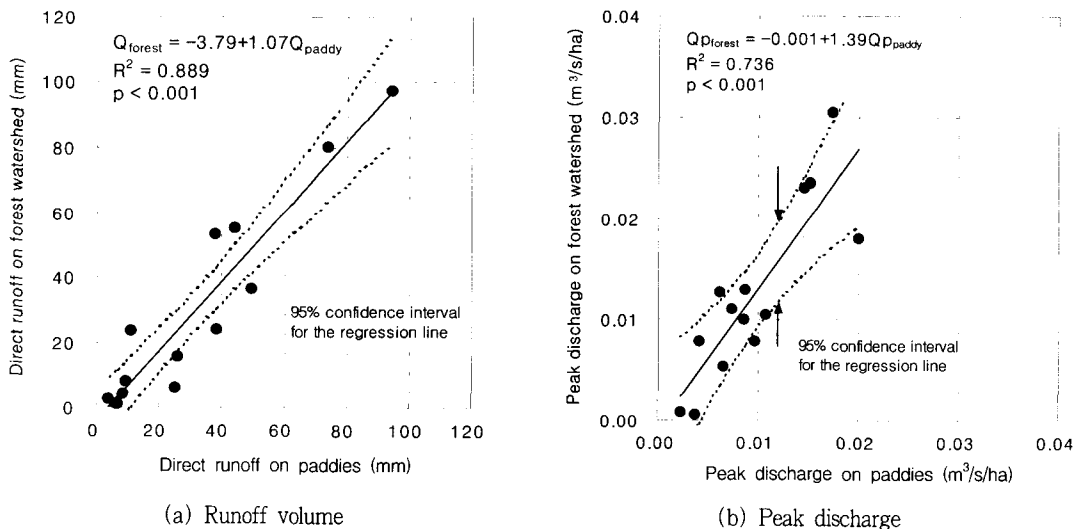


Fig. 4 Results of linear regression analysis on the paired watershed

관개논이 홍수저감효과를 가지고 있음을 알 수 있었다.

한편, Fig. 4는 직접유출량과 침투유량에 대한 회귀관계식을 표시한 것으로, 95%의 신뢰구간을 같이 나타내고 있다.

IV. 요약 및 결론

강우시에 발생하는 홍수유출량은 유역의 토지이용에 많은 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 산림유역과 관개논 지구에 대하여 수문계측망을 구성하고, 강우량 및 유출량 자료를 수집하여 분석함으로써 토지이용에 따른 홍수유출량의 변화를 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 발안유역의 산림유역과 관개논 유역에 대하여 수문계측망을 구성하고, 동일한 강우에 대한 유출량 자료가 각각 존재하는 14개의 강우-유출량 자료를 선정하였다.

② 산림유역과 관개논 유역의 직접유출량과 침투유량을 시기별로 비교한 결과, 직접유출량은 시기별로 유사한 경향을 보였으나 침투유량은 8월에는 산림유역이 관개논 보다 79% 정도 크게 나타났으며, 9월에는 관개논이 55% 정도 크게 나타났다.

③ 강우량의 변화에 따른 직접유출량을 비교하면 60 mm보다 적은 강우에서는 관개논이 산림유역보다 크게 나타났으며, 60 mm보다 큰 강우에 대해서는 두 유역에서 유사하게 나타났다. 침투유량의 경우, 60 mm보다 적은 강우에서는 관개논이 조금 크게 나타났으며, 60~90 mm의 강우에서는 산림유역이 92% 정도 크게 나타나고, 90 mm 이상의 강우에서는 유사한 경향을 보였다.

④ 단순회귀분석을 실시한 결과, 산림유역의 직접유출량은 관개논과 매우 유사하며 그 차이는 7% 정도였으며, 침투유량은 39% 정도 산림유역이 크게 나타났다.

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 핵심전문연구 (과제번호: 981-0607-030-2)에 의해 수행된 것임.

References

1. Kim, C. M., S. W. Park, and S. W. Im. 2000. Runoff Hydrograph Synthesis from Small Watersheds Considering Hydrological Characteristics of Irrigated Rice Paddies. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 42(6): 56-62 (in Korea).
2. Ministry of Agriculture and Forestry. 2000. *Yearbook of Agricultural Land and Water Development Statistics* (in Korea).
3. Park, S. W.. 2000. Monitoring Agro-Ecological Environments and Developing Comprehensive Agricultural Environmental Management Systems. *Ministry of Agriculture and Forestry* (in Korea).
4. Eom, K. C., S. H. Yun, S. W. Hwang, S. G. Yun, and D. S. Kim. 1993. Public Benefit from Paddy Soil. *Journal of Korean Soc. Soil Sci. Fert.* (26)4: 314-333 (in Korea).
5. Im, S. J., and S. W. Park. 1997. Estimating Runoff Curve Numbers for Paddy Fields. *Journal of Korea Water Resources Association* 30(4): 379-387 (in Korea).
6. Jun, Y. H.. 2000. Study on the Quantifying multifunctionality of rice paddy farming in Korea. A Master's Thesis. *ChungNam Prov.: ChungNam National University* (in Korea).
7. Yoshio Hayase. 1994. Ebaluation of Paddy Field's Functions for Flood Control and a Proposal of Their Enhancing Project. *Trans. of JSIDRE* 62(10): 943-947.
8. Koichi Sato. 1996. A Depression in Management of Regional Resources Followed by Depopulation in Hilly Rural Area. *Trans. of*

- JSIDRE* 182: 57-64.
9. Choi, J. K., H. Y. Kim, and J. G. Son. 1997. A study on the outlet drain discharge from paddy field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 39(2): 134-142 (in Korea).
10. Anderson, M. G. and T. P. Burt. 1990. Process studies in hillslope hydrology, *John Wiley & Sons*, p. 539.
11. Cooke, R. A., S. Mostaghimi, and P. W. McClellan. 1995. Application of robust regression to the analysis of BMP effects in paired watershed. *Trans. of the ASAE* Vol. 38(1): 93-101.
12. Maidment, D. R.. 1993. Handbook of hydrology, *McGraw-Hill, Inc.*