

SWAT 모델을 이용한 갑천유역에 대한 수문 특성 분석 및 도시화 영향 평가

Evaluation of Urbanization Effect and Analysis of Hydrological Characteristics in the Gap River Catchment using SWAT

김정곤* / 손경호** / 노준우*** / 장창래**** / 고익환*****

Kim, Jeongkon / Son, Kyongho / Noh, Junwoo / Jang, Chang-Lae / Ko, Ick Hwan

Abstract

Hydrological characteristics and urbanization effects in the Gap river catchment were investigated employing the SWAT model. The hydrological characteristics analysis showed that total runoff in the whole catchment from 2001 to 2004 consists of 44% of groundwater flow, 6% of lateral flow and 50% of surface flow under year 2000 landuse conditions. The analysis of urbanization effect using different landuse maps for year 1975 and 2000 indicated that although 5% increase in urbanized areas did not significantly impact on the total runoff in the whole catchment, a sub-basin where urbanized area increased by 32% over the past 30 years showed 68 ~ 73% decrease in groundwater flow and 22 ~ 66% increase in surface flow. It was found that urbanization decreased overall soil moisture and percolation rate except for some increase in soil moisture during dry season. Urbanization effect was found more sensitive during a dry year which has less rainfall and higher evapotranspiration than during a wet year. Therefore, from the results of this study we could infer increased flood damage during wet season and dried stream during dry season due to urbanization. To conclude, the results of this study can provide fundamental information to the eco-friendly restoration project for the three major rivers (Gap-cheon, Yudeung-cheon and Daejeon-cheon) in Daejeon Metropolitan City.

keywords : water cycle, baseflow, groundwater, SWAT, urbanization, runoff characteristics

- * 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, 공학박사
Corresponding Author Principle Researcher, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea (e-mail: jkkim@kwater.or.kr)
- ** 한국수자원공사 수자원연구원 연구원, 공학석사
Researcher, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea
- *** 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, 공학박사
Senior Researcher, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea
- **** 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, 공학박사
Senior Researcher, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea
- ***** 한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소 소장, 공학박사
Director, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

요 지

SWAT 모형을 이용하여 대전 3대 하천 유역의 수문 분석 및 도시화에 따른 영향을 평가하였다. 물수지 분석결과에 의하면, 전체적으로 총 유출량 중 지하수 유출량이 44%정도, 중간 유출량이 6% 그리고 지표유출량이 50%이다. 도시화 영향 분석 결과 전체적으로 1975년에서 2000년까지 갑천유역의 약 5%가량의 도시화는 총 유출량의 변화에 있어서는 현저한 차이를 보이지 않았으나, 도시화율이 32%정도 증가한 소유역의 경우 유출 성분 분석에서 침투 유출량의 경우 25~66%의 증가를 보였고, 지하수 유출량의 경우 68~73%의 감소를 확인 할 수 있었다. 그리고 도시화의 영향으로 토양수분량은 건기를 제외한 모든 시기동안 감소한 반면 침투량은 모든 시기동안 감소하였다. 도시화의 영향은 강우량이 적고, 증발량이 많은 갈수년에 더 크게 나타났다. 이 결과로부터 도시화의 영향으로 풍수기 동안의 홍수피해 증가 및 갈수기 동안의 하천의 건천화 문제를 유추 할 수 있을 것이다. 결론적으로 본 연구에서 수행한 수문 분석 및 도시화 영향분석 결과는 향후 대전 3대 하천의 생태하천복원을 위한 물순환 정상화 대책마련 및 하천의 유량확보방안 마련을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 도시하천복원, 물순환, 기저유출, 지하수, SWAT

1. 서론

도시화에 따른 수문현상 및 물순환 체계에 의하여 도시 하천 유역에 많은 문제점이 야기되고 있다. 그 예로는 도시개발에 의해 우수의 불 투수지역 확대, 하천 부지의 축소, 산림 및 우수지의 감소 등이 급속히 진행되어 하천 유량의 변화, 지하수위의 저하 등을 들 수 있으며, 그로 인해 도시 지역은 도시형 수해 발생, 갈수기의 급수 안전도 저하, 평시 하천유량의 감소로 인한 공공수역의 수질 악화, 지하수 오염 등 여러 가지 문제에 직면하고 있다. 도시하천의 개발 또는 복원에 있어 하천의 주변경관과 오락적 기능을 지나치게 강조하기 보다는 기본적으로 고려되어야 하는 하천 고유의 특성 분석과 이에 따른 물 순환분석의 중요성에 대한 인식이 높아지고 있다. 김현준 등(2004)은 청계천유역에 대하여 SWAT 및 WEP을 이용하여 물순환 분석을 실시하였고, 이승중 등(2005)은 WEP모형을 이용하여 도립천 유역의 물순환을 모의하고, 과거(1975년)과 현재(2000년) 토지 이용도를 이용한 모의를 통해서 도시화에 따른 불 투수층의 증가가 유출 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 박민지 등(2005)은 HSPF 모형을 이용한 도시화 평가에 있어 강수조건과 토지 이용 변화에 따른 유출 특성 분석에서 도심지의 증가와 산림의 감소에 따라 총 유출량은 증가하고, 특히 강우 강도가 높은 해가 침투유출량의 증가율이 가장 높음을 보였다.

이와 같이 실제적인 도시화에 따른 영향 평가를 내리고, 대책을 세우기 위해서는 우선적으로 수문학적 모니터링이 요구된다. 하지만 복잡한 수문학적 현상과 토지 이용변화의 직접적인 관계를 성립하고 이해하기 위해서는 모니터링만으로 충분하지 못하고, 수학적 수

문모델이 필수적이다. 도시화 혹은 토지 이용도 변화에 따른 수문학적 모델을 이용한 분석에 있어서, 대부분 유역의 공간 및 시간적인 변화를 모의하기 위해서 물리적 기반의 분포형 혹은 준 분포형 모형을 선호하는 경향이 있지만, 실제적으로 많은 수문 모형들이 유출량만의 검증은 거친 후 사용되기 때문에 분석 결과에 대한 모호함과 불확실성을 내재하고 있음을 부정할 수 없다.

이에 대한 대안으로 다 목적·지역 모델 검증 방법을 통한 모델 검·보증 방법이 많이 사용되고 있는 추세이다. Kim et al. (2005)은 안전천 유역의 도시화 영향평가를 위해서 격자 바탕의 분포형 모형 적용 시, 측정된 토양 수분을 이용하여 모형의 검증을 시도하여, 그 평가에 대한 유효성을 높이는 시도를 하였고, 도시화 영향 평가에 있어서 토지 이용도 변화에 따른 총 유출량의 비교, 총 유출량 대비 각 유출 성분의 비교, 각 토지 이용도에서의 지표수량과 총 지표수량과의 비교 등 세 가지 방법을 적용하였다. Mroczkowski et al. (1997)은 CATPRO 모형을 산림의 제거의 변화를 겪은 Wights 유역과 급격한 토지 이용도 변화가 없는 Salmon 유역에 적용 시, 유출량의 변화만으로 검·보증된 모형과 chloride 및 지하수 수위를 이용하여 검증된 모형의 적용결과를 비교·분석 하였다. 그 결과 토지 이용도 변화가 없는 유역의 경우 유출량만으로 검증된 모형과 chloride 및 지하수 수위로 검증된 모형의 차이를 발견 할 수 없었으나, 토지 이용의 변화가 큰 Wights 유역의 경우는 유출량만으로 검증된 모형은 관찰된 chloride와 지하수 수위를 정확히 예측할 수 없었다. 그러므로 토지 이용도 변화에 대한 연구를 위해서는 좀 더 세밀하고 강력한 모델 검증이 요구 된다.

본 연구의 대상지역인 갑천유역은 1975년부터 현재까지 대략 5%의 도시화가 이루어지고 있다. 이 도시화의 영향으로 하천의 건천화 문제가 대두되고 있는 실정이다. 이에 대한 대책으로 대전광역시 갑천 유등천 대전천을 중심으로 도시하천의 생태하천 복원사업을 추진 중이다. 본 연구는 갑천유역에 다 목적 및 다 지역 모델 검증 을 통해서 구축된 SWAT 모형(김정곤 등, 2006)을 이용하여, 갑천유역의 수문현상에 대한 이해를 높이는 한편 과거 자료를 바탕으로 도시화의 영향평가를 정량적으로 실시하였다.

2. 유역 특성 및 모형구축

2.1. 유역 특성

갑천유역에 대하여 SWAT모형을 이용하여 수문현상 및 도시화 영향 평가를 위한 모형이 구축되었다.(김정곤 등, 2006). 갑천유역은 유역면적이 648.3km², 유로연장이 73.7km로서 형상계수가 약 0.119인 비교적 장방형 형상을 하고 있으며 대전광역시 시가지 중심부를 관류하는 큰 두 지류(유등천, 대전천)로 구성된 대체로 수지

형 특성을 나타내고 있다. 전체 유역을 유역의 토양 및 토지이용 특성을 고려하여 22개 소유역으로 구분하였으며, 각 소유역은 세부 수문반응단위(HRU)로 구성되어 있다. Fig. 1은 구축된 모형의 소유역, 주요 수계 및 하천, 그리고 지하수 관측 지점을 보여주고 있다.

갑천유역은 지난 30여 년간 도시화가 꾸준히 진행되었는데 Fig. 2에 1975년부터 2000년까지의 대전 3대 하천 유역의 도시화 진행 및 토지 이용률의 변화에 따른 불투수율의 변화를 나타내었다. 토지이용도는 한강 유역조사에서 위성영상을 이용해 수치지형도와 혼합하여 구축된 것이다. 1975년에 약 5%정도인 도시화율이 2000년에는 10% 가량까지 증가된 상태이다. 각 소유별로 도시화 정도를 살펴보면, 갑천과 정부 대전청사가 위치하고 있는 유등천의 합류지역의 22번 소유역이 31%의 높은 증가율을 보였고, 일반적으로 유역 하류 지역에 도시화 증가율이 높고, 상류지역은 5%미만의 도시화 증가율을 보이고 있다(Table 1). 1975년과 2000년도의 토지 이용도를 비교해보면, 산림 지역은 10% 정도 감소하였으며, 논 지역은 5% 감소한 반면 밭 지역은 8% 증가하였다(Table 2).

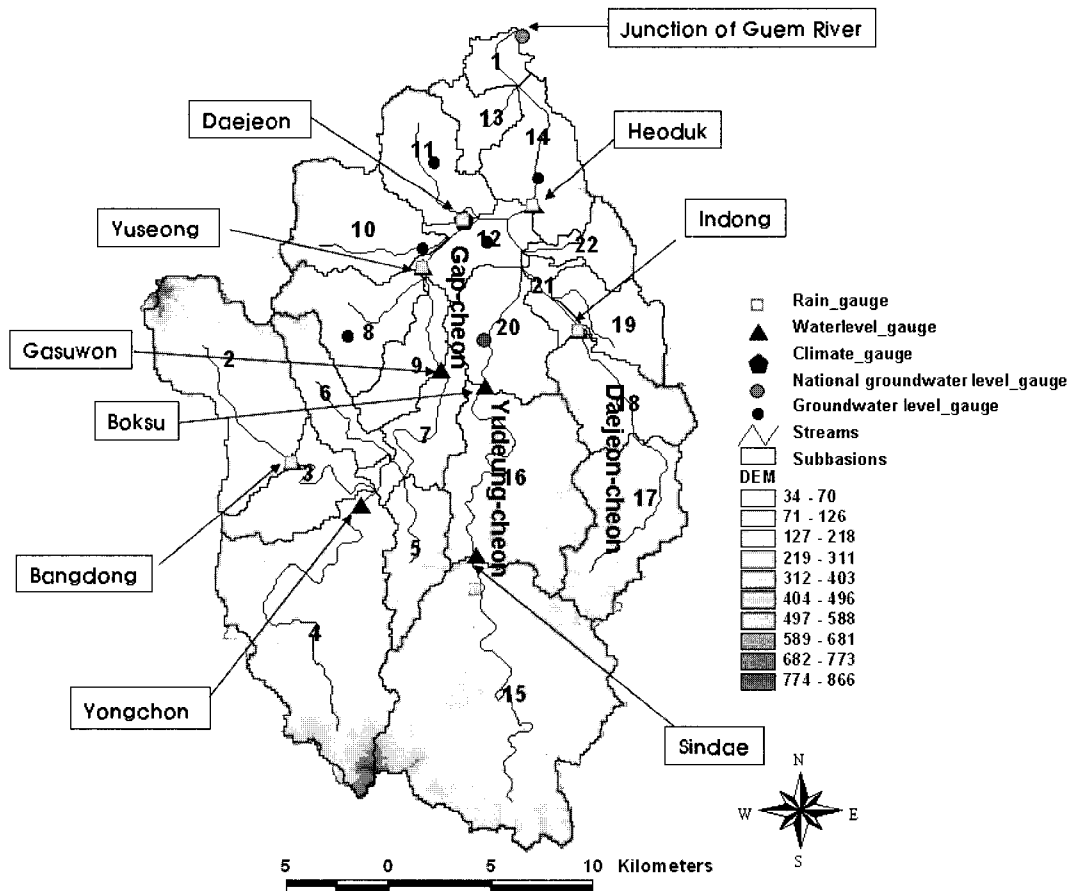


Fig.1. Map of Gap-cheon catchment showing DEM, major rivers, subcatchments, and monitoring locations

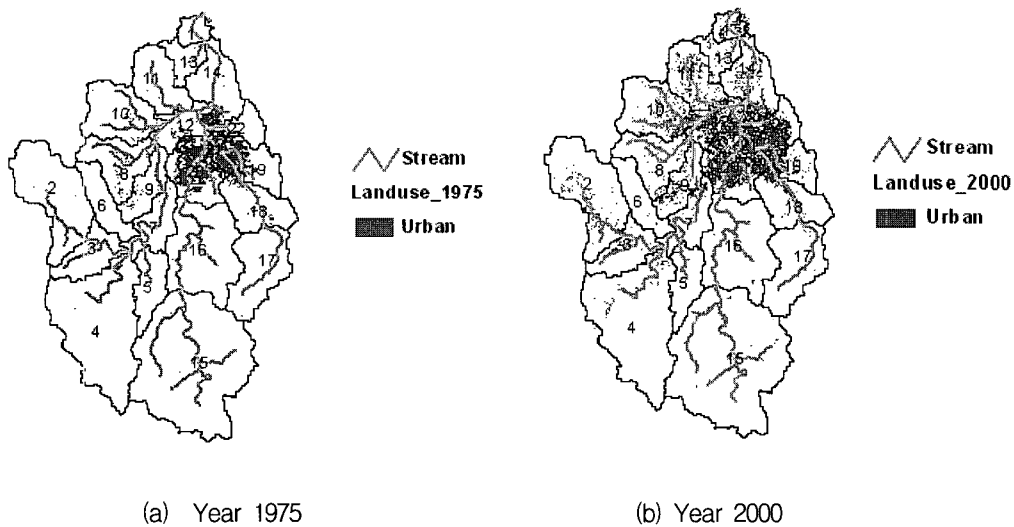


Fig. 2. Landuse change in the Gap-cheon catchment : (a) year 1975 and (b) year 2000

Table 1. Comparison of landuse between year 1975 and 2000 in the Gap-cheon catchment

Year	Water (water)	Urban (urld)	Barren (agrc)	Wetland (wet)	Pasture (past)	Forest (frst)	Paddy (rice)	Field (agrr)	Total
1975	0.22	5.07	2.06	0.56	2.60	68.64	20.86	0.00	100
2000	0.22	10.45	1.20	0.00	3.96	59.84	15.66	8.67	100

Table 2. Change of impermeable areas at each subcatchment due to urbanization from year 1975 to year 2000.

Subcatchment	Impermeable area (%)		Increase (%)
	1975	2000	
1	1	22	21
2	0	6	6
3	0	5	5
4	0	4	4
5	0	5	5
6	0	1	1
7	1	5	4
8	6	8	2
9	6	9	3
10	4	15	11
11	1	16	16
12	17	41	24
13	1	6	5
14	5	20	15
15	0	1	1
16	0	1	1
17	0	1	1
18	9	13	4
19	27	37	10
20	43	52	9
21	69	73	4
22	7	39	32

2.1. 모형 구축

본 연구에서는 갑천유역의 도시화에 따른 수문현상의 변화를 분석하기 위하여 연속적 준 분포형 모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하였다. SWAT 모형은 장기간에 걸친 다양한 토양속성과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량, 유사량 및 농업화학물의 영향을 예측하기 위한 모형으로서 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발되었다(Neitsch et al., 2002). 기본적으로 SWAT 모형은 수문, 토양유실, 영양물질, 그리고 하도추적 등 4개의 submodel로 구성되어 있다. SWAT 모형의 입력 자료는 GIS를 통해 자동으로 구성되는 유역의 일반적인 자료와 토양자료 및 작물 자료가 있고, 수동 입력을 통해 작성되는 기상 하도추적 농업관리 지하수 등의 자료, 그리고 GIS와 수동입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분된다. 또한 출력 자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU)별 출력 자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과 값으로 구분된다(Luzio et al., 2000). 갑천 유역에 대한 SWAT 모형의 구축 및 검·보정에 관한 자세한 내용은 김정곤 등(2006)에 설명되어 있다.

3. 결과 및 토의

도시화에 따른 영향을 다양한 수문조건에서 살펴보기 위하여 2001년부터 2003년까지의 수문자료를 이용하였다. Fig. 3은 2001년부터 2003년까지의 월별 강우량 및 잠재증발량을 보여주고 있다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 2001년은 강우량이 매우 작은 갈수년(788.8mm)이었고, 2002년은 평수년(1313.5mm) 수준, 그리고 2003년은 강우량이 매우 많았던 풍수년(1945.5mm)에

해당된다. 갑천유역은 일반적으로 강우량이 많은 연도에는 잠재 증발량이 작은 특징을 보이며, 연도 별로 최대강우량과 최대 잠재 증발량이 발생하는 달이 다르게 나타났다. 2001년도의 경우 6월에, 2002년에는 8월에, 그리고 2003년에는 7월에 최대 강우가 발생하였다. 이에 비해 잠재 증발량의 경우 2001년의 경우 5월에, 2002년에는 6월에, 2003년의 경우에는 5월에 최대값을 나타냈다. 이러한 다양한 수문조건은 도시화에 따른 수문현상의 변화를 살펴보는데 매우 적절할 것이다.

3.1 수문특성분석

갑천유역에 구축된 물순환시스템을 이용하여 2001년부터 2003년 기간의 유역 연평균 물수지 분석결과를 Table 3에 나타내었다. 갈수년에 해당하는 2001년의 경우, 총 강우량 788.8mm 중 증발산량이 457.8mm로 가장 많고 다음으로 지하수 유출량이 165.1mm, 측면유출량이 27.5mm, 지표유출량이 140.6mm의 순서로 나타났다. 그러나 평수년에 해당하는 2002년의 물수지 분석 결과는 2001년과 차이를 보이고 있는데 총 강우량은 1,313.5 mm로 2001년도의 788.8mm에 비해 1.7배 이상 증가하였으나, 총 유출량이 증발산보다 더 많은 양을 차지하고 유출량의 비율도 2001년도와 다른 양상을 보인다. 풍수년인 2003년의 경우는 2002년보다 더 많은 강우량으로 인해 유출량이 많이 증가한 반면 증발산량은 강우량에 비해 갈수기인 2001년 값보다 적게 나타났다. 전체적으로 강우가 증가할수록 유출률(Q/P)이 증가하는 양상을 보이고 있으며 갈수년(2001년)에는 0.42인 유출률이 풍수년(2003년)에는 0.74로 증가하였다. 그러나 토양 수분의 경우 토양이 함유할 수 있는 최대 양이 정해져 있기 때문에 일정 수준 이상의 강우 증가는 토양수분의 증가에는 영향을 미치지 못하므로 강우의 증가에 비해 토양수분 양에는 특별한 변화가 없다. 3년간

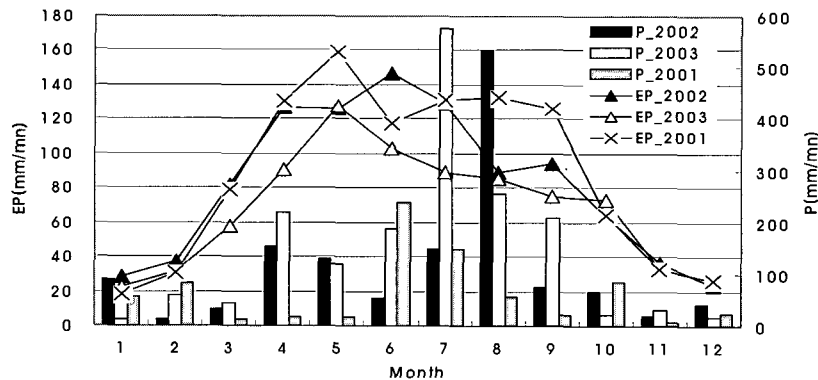


Fig. 3. Monthly precipitation and potential evaporation from 2001 to 2003 as collected at the Daejeon climate station

Table 3. Analysis results of hydrological characteristics under various conditions

Year	P (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PER (mm)	SW (mm)	ET (mm)	WY (mm)	Q/P (mm/mm)
2001	788.8	139.72	24.4	141.5	150.8	153.4	486.0	305.2	0.39
2002	1313.5	371.9	44.4	314.4	338.5	167.0	543.8	730.0	0.56
2003	1945.5	706.5	74.1	643.4	682.2	156.9	490.8	1423.2	0.73
Avg.	1349.3	406.0	47.6	366.4	390.5	159.1	506.8	819.5	0.61
Q/P		0.30	0.04	0.27	0.29	0.12	0.38	0.70	0.61
Q/WY		0.50	0.06	0.44					

P: rainfall, SURQ: surface flow, LATQ: lateral flow, GWQ: shallow groundwater flow, PER : recharge flow, WY: water yield, SW: soil moisture, ET: evapotranspiration, WY: water yield, Q: total runoff

총 유출량 중 지표유출량이 50% 중간 유출량이 6% 그리고 지하수 유출량이 44%로 나타났다.

3.2 도시화의 영향 분석

도시화지역의 도시화에 따른 영향으로 홍수기에 침투유량의 증가와 갈수기에 기저유량의 감소 등이 알려져 왔다(박민지 등, 2005; 이승종 등, 2005). 토지이용도(1975년 및 2000년)외에는 모든 조건이 동일한 조건에서 갑천유역의 도시화에 따른 수문학적 영향을 분석하였다. 먼저 전체 유역에 대하여 살펴보고 도시화가 가장 많이 이루어진 소유역을 대상으로 도시화에 따른 주요 수문 요소별 변화에 대한 정밀분석을 실시하였다.

3.2.1. 유역 전체

유역 최종 유출지점을 기준으로 유출특성을 Table 4에 나타내었다. 모의 결과를 정량적으로 파악하기 위해 조건별 총 유출량, 성수기와 비성수기의 유출변화량, 그리고 침투 유출량으로 구분하여 정리하였다. 총 유출량은 갈수년(2001), 평수년(2002) 그리고 풍수년(2003)으

로 구분하여 나타내었고, 이를 다시 홍수기와 건기 유출량으로 세분하였다. 홍수기 총 유출량은 각 강우별 6월부터 9월까지의 총 유출량이며, 평·갈수기 총 유출량은 1년 중 홍수기 때를 제외한 나머지 기간의 총 유출량을 나타낸다. 침투유량은 해당 연도에서 가장 큰 일 유출량이다.

갈수년(2001)의 경우 도시화로 인하여 총유출량이 7%, 침투 유량이 9%, 홍수기 유출량이 9%, 그리고 평·갈수기 유출량이 5% 증가하였다. 평수년(2002)의 경우에는 총 유출량이 4%, 침투 유량이 4%, 홍수기 유출량이 3%, 그리고 평·갈수기 유출량이 7% 증가하여, 갈수년(2001)과 비교했을 때 도시화에 의한 영향이 다소 감소하였다. 풍수년(2003)의 경우는 상대적으로 다른 기간보다 도시화에 따른 영향이 미미하게 나타났다. 그 이유는 많은 강우에 의해 토양이 습해지는 빈도가 상대적으로 높아지고, 강우와 하천으로 들어오는 유출량의 도달 시간이 짧아지면서, 불투수층의 증가로 가정된 도시화의 영향은 더 낮은 민감도를 보이고 있다.

Table 4. urbanization effect conditional to landuse and rainfall variability

Period	Land-use	Rainfall (mm/yr)	Maximum Rainfall (mm/d)	Total Flow (m ³ /s)	Peak Flow (m ³ /s)	Flow during the Flood Period (m ³ /s)	Flow during the Low Flow Period (m ³ /s)
2001	1975	788.8	98.0	1554.8	74.5	861.8	693.1
	2000			1668.2	81.4	943.3	725.2
	Comparison			+7%	+9%	+9%	+5%
2002	1975	1313.5	174.0	4167.9	322.0	3492.7	675.3
	2000			4335.5	334.0	3612.0	723.9
	Comparison			+4%	+4%	+3%	+7%
2003	1975	1945.5	154.5	9445.3	546.0	8484.4	970.82
	2000			9560.4	556.0	8543.4	1017.32
	Comparison			+1%	+2%	+1%	+5%

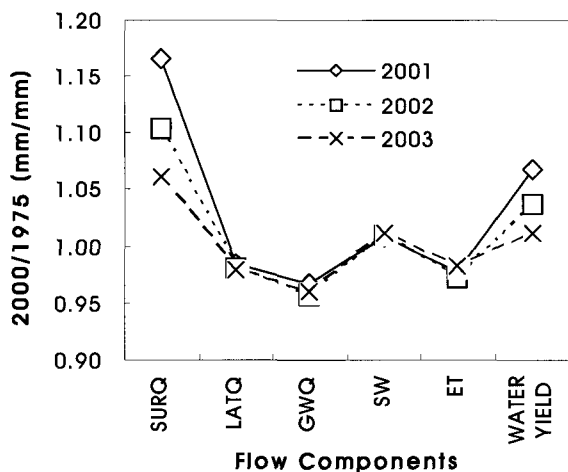


Fig. 4. Effects of increased urbanization on flow components for the entire basin

도시화에 따른 불투수층 증가가 유출 성분에 미치는 영향을 분석하였다(Fig. 4). 먼저 지표수량의 경우 갈수년(2001년)에 17% 가량의 증가를 보이고, 평수년(2002년)에는 10%, 풍수년(2003년)에는 6%로 증가폭이 줄어들었다. 측면 유출량은 모든 해에 약 2%가량 감소하였다. 지하수 유출량(GWQ)은 갈수년에 3% 감소하고 평수년과 풍수년에는 4%가량 감소하였다. 증발산량(ET)은 전체적으로 2-3% 정도 감소하였다. 토양수분의 평균치의 변화량은 다른 유출 성분에 비해 적은 변화를 보이고 있다. 특이한 사항으로는, 도시화가 더 많이 진행된 2000년의 토지이용도 조건에서 토양수분 값이 증가한 것으로 나타났다. 이 까닭은 토양으로 유입되는 양은 감소하였지만, 도시화에 따른 실제 증발량의 감소가 더 크기 때문에 전체적으로 토양수분 값이 증가한 것으로 보인다. 결론적으로 도시화로 인한 토지 피복의 변화는 유출성분 중 지표수량(증가)과 지하수량(감소)에 가장 큰 영향을 끼친 것으로 나타났다. 연구대상 전 유역을 대상으로 1975년부터 2000년까지 발생한 5% 정도의 도시화를 증가로 인한 지하수 유출량 4%의 감소와 지표수 유출량 17%의 증가 등의 수문학적으로 영향 확인을 할 수 있다.

3.2.2. 도시화가 가장 많이 진행된 소유역을 대상으로

갑천유역에서 도시화가 현저하게(32%) 이루어진 소유역 22번(Fig. 1 참조)을 대상으로 도시화에 따른 영향 분석을 실시하였다. Fig. 5는 22번 소유역에서 도시화로 인한 유출 성분변화를 보여주고 있다. 전 유역을 대상으로 유역의 최 하단부의 수문분석에서는 갑천유역에서

5%정도의 도시화를 증가에 따른 수문학적 변화는 크지 않은 것으로 나타났지만(Fig. 4), 22번 소유역에서는 침투 유량이 25-66% 증가하였고, 지하수 유출량은 68-73% 감소한 것으로 나타났다. 본 결과에서 알 수 있듯이 도시화는 유역의 어느 부분에서 집중적으로 일어나게 되고 실제 큰 변화를 겪은 소유역은 수문학적으로 큰 변화를 보이게 된다. 이러한 결과는 도시화의 영향이 큰 소유역과 직접 연계되어 있는 지류 하천에 큰 영향을 끼치게 된다. Fig. 5에 나타난 유출 성분의 변화를 보더라도, 갈수기 동안의 지하수 유출수에 의존하는 하천의 경우, 하천의 건천화 문제를 겪을 것을 예상할 수 있다.

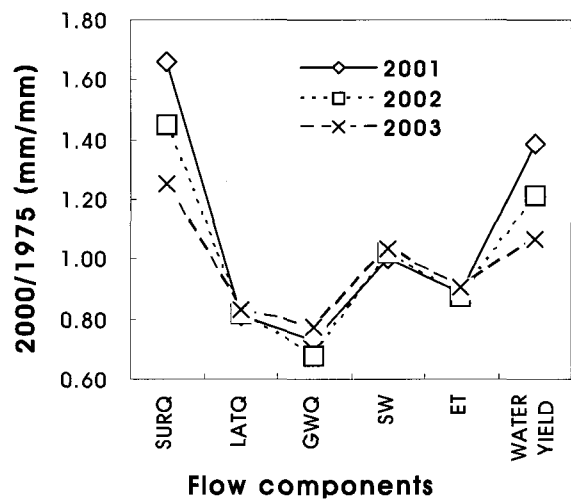


Fig. 5. Effects of increased urbanization on flow components for sub-catchment 6

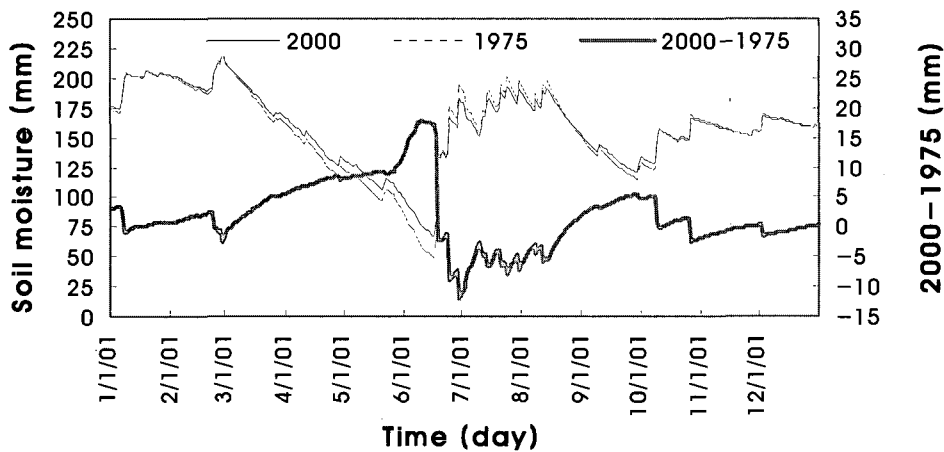
Fig. 6은 22번 소유역에서 도시화 증가로 인한 토지이용 변화가 토양수분량에 미치는 영향을 갈수년(2001년)과 풍수년(2003년)에 대하여 보여주고 있다. 먼저 갈수년의 토양수분량 변화폭이 170mm(최저 50mm, 최고 220mm)인 반면 풍수년의 경우에는 90mm(최저 140mm, 최고 230mm)로 최저값과 최고값이 갈수년에 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 또한 최저값과 최고값에서 알 수 있듯이 강우량의 차이에 의해서 최저값의 차이는 크지만 최고값은 비슷하며, 이는 유역 특성상 최대 토양수분함량이 제한되어 있기 때문이다.

토지이용 변화에 따른 토양수분량 변화(2001년 토지이용도 조건에서의 토양수분량 - 1975년도 조건에서의 토양수분량)를 살펴보면, 갈수년에는 30mm(-12.5 ~ +17.5), 풍수년에는 18mm(-7 ~ +11)로 갈수년에 영향이 큰 것을 알 수 있다. 갈수년인 2001년의 경우, 1975년의 토지 피복에 비해 2000년도 토지 피복 조건에서

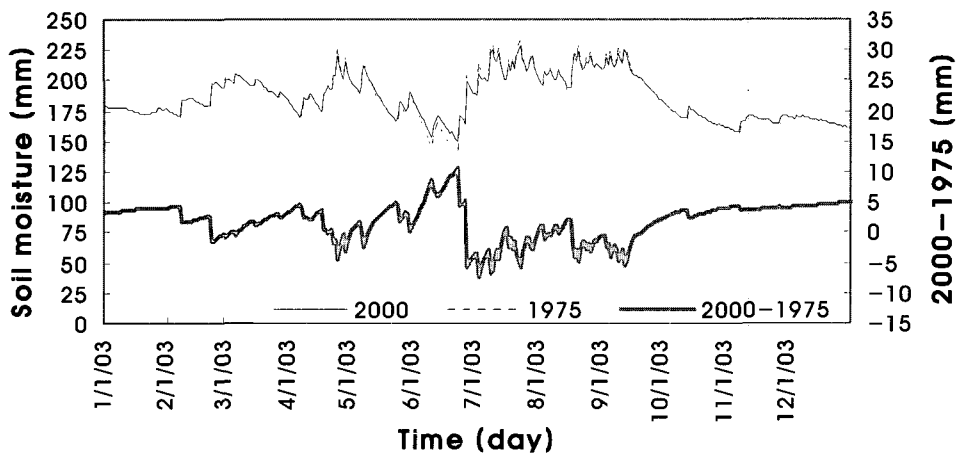
강우량이 많은 기간 동안에는 상대적으로 낮은 토양 수분량을 보이고, 건기동안에는 상대적으로 증발산량이 높은 1975년 토지 피복의 경우가 더 낮은 토양 수분량을 보인다. 그리고 높은 증발산량의 영향으로 1975년 토지 피복조건에서 5월 ~ 6월에 수분량 감소곡선의 기울기가 상대적으로 높음을 알 수 있다(Fig. 6a). 풍수년의 경우에는, 높은 강우량의 영향으로 도시화 영향이 최소화 되고, 토양 수분량의 변화차가 상대적으로 작게 나타난다. 그리고 강우량에 비해 높은 증발산량을 가지는 건기동안에는 2000년 토지피복 조건에서 더 높은 토양 수분량을 보이고 있다. 전반적으로 도시화율의 증가는 토양수분함량에 영향을 미치고 있으며, 그 영향은 갈수년에 더 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 토지이용 변화에 따른 갈수년(Fig. 7a)과 풍수년(Fig. 7b)의 연간 지하수 함양량 변화를 보여주고 있다. 강우량이 789mm인 2001년의 경우, 1975년에 해

당하는 토지이용의 경우 지하수 함양량이 56.1mm인 반면 2000년의 토지이용의 경우에는 40.6 mm로 38%로 감소하였다. 강우량이 1945mm로 풍수년인 2003년에는 토지이용 변화에 의해 지하수 함양량이 429.9mm에서 329.9mm로 30% 감소하였다. 갈수년과 풍수년에 모두 지하수 함양량이 감소하였지만, 토양수분 함양량에 대한 영향과는 달리, 지하수 함양량의 경우에는 강우 조건에 따른 영향이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 그리고 상대적으로 낮은 토양 수분량을 함유하는 3월의 경우 높은 침투량을 보이는 반면 7-8월에 비해 강우사상에 비해 낮은 침투량을 보이고 있다(Fig. 7a). 이 까닭은 3월의 경우 낮은 토양수분량으로 인해, 지표면에 도달한 강우중 많은 부분이 토양으로 침투하는 반면, 상대적으로 높은 토양 수분량을 가지는 7-8월에는 지표 유출량의 증가로, 실제로 토양 속으로 침투하는 강우량은 상대적으로 적기 때문이다.

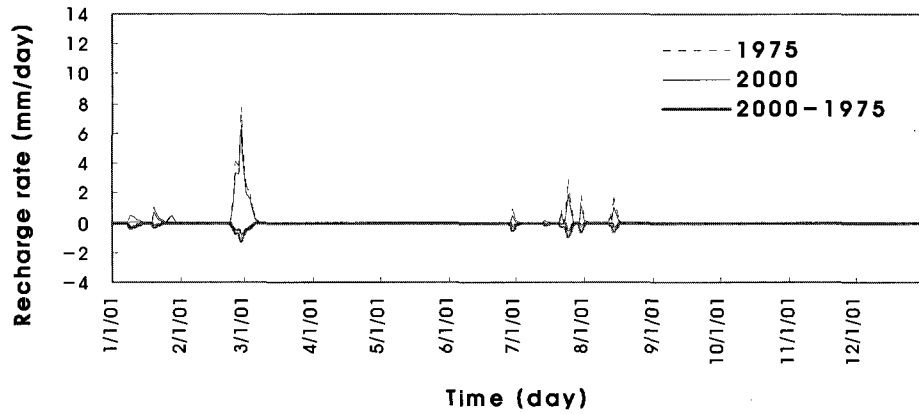


(a) Dry year (2001)

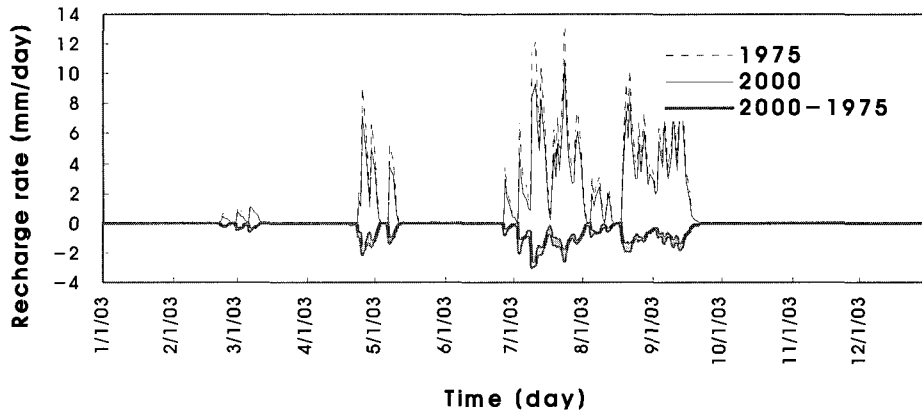


(b) Flood year (2003)

Fig. 6. Effects of increased urbanization on soil moisture at sub-catchment 6



(a) Dry year(2001)



(b) Flood year(2003)

Fig. 7. Effects of increased urbanization on groundwater recharge at sub-catchment 6

4. 결 론

본 연구의 대상지역인 갑천유역은 현재 도시화율이 약 12%로써 1975년부터 2000년까지 약 5% 증가되었다. 이러한 도시화의 증가는 하천의 건천화 문제, 수질문제, 생태환경 등 다양한 문제들을 수반하게 된다. 이에 대한 대책으로 대전광역시를 중심으로 도시하천의 친자연형 하천으로의 복원사업을 추진 중이다. 본 연구에서는 이 복원 사업의 중심인 갑천유역내의 수문현상에 대한 이해를 높이는 한편 과거 자료를 바탕으로 도시화에 따른 영향에 대한 정량적 평가를 시도하였다. 이 평가를 위해서 갑천유역에 다 목적 및 다 지역 모델 검증을 통해서 구축된 SWAT 모형(김정곤 등, 2006)을 이용하여 유역전체의 유출특성 및 도시화로 인한 수문현상의 변화를 분석하였다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 갑천유역의 물순환 분석결과 2001~2003년까지 3년 평균 지표 유출량이 50%, 중간 유출량이 6% 그리고 지하수 유출량이 44%로 나타났다.

- (2) 도시화로 인한 토지 피복의 변화는 유출성분 중 지표수량(17% 증가)과 지하수량(-4% 감소)에 가장 큰 영향을 끼친 것으로 나타났다. 갑천 전 유역을 대상으로 1975년부터 2000년까지 발생한 5% 정도의 도시화율 증가는 강우량과 증발산량의 상대적 영향으로 인해 강우량이 낮고 증발산량이 높은 갈수년이 강우량이 높고 증발산량이 낮은 풍수년에 비해 높게 나타났으나, 전체적으로 수문학적으로는 큰 영향은 없는 것으로 나타났다.

- (3) 대부분의 도시화 과정에서 도시화 현상이 집중된다고 볼 때 일부 소유역에서는 그 영향을 무시할 수 없을 수도 있으므로, 각 소유역중 도시화율 증가가 가장 큰 소유역을 대상으로 정밀 수문분석을 실시한 결과 지표 유출량이 25~66% 증가하였고, 지하수 유출량은 68~73% 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해서 도시화에 따른 영향이 큰 소유역과 직접 연계되어 있는 지류 하천에 많은 영향을 끼치게 될 것임을 알 수 있다. 특히, 하천 유량이 적고 갈수기 동안 지하수 유출수에 의존하는 하

천의 경우, 하천의 건천화 문제가 심각하게 나타날 수 있을 것이다.

- (4) 토지 피복도 변화에 의한 토양수분량의 변화는 갈수년은 증발산량의 영향으로 건기동안 1975년 토지 피복 이용 시 낮은 증발산량을 보였다. 반면 풍수년의 경우에는, 높은 강우량의 영향으로 도시화 영향이 최소화 되고, 토양 수분량의 변화 차가 건기에 비해 낮게 나타났다. 지하수 함양량의 경우 2000년의 토지 피복도 이용 시 1975년도의 토지 피복도 이용 시에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 양적으로는 갈수년(2001)에는 38%, 풍수년(2003)에는 30%의 지하수함양량 감소를 보이고 있다.
- (5) 전반적으로 도시화율의 증가는 토양수분함량에 영향을 미치고 있으며, 그 영향은 갈수년에 더 큰 것을 알 수 있다. 토양수분 함양량에 대한 영향과는 달리, 지하수 함양량의 경우에는 강우 조건에 따른 영향이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 토양수분량과 지하수 함양량의 정확한 이해는 갈수기에 하천의 적정 유량확보 문제와 홍수기에 침투유량 문제에 대한 기초 정보를 제공할 수 있을 것이다.
- (6) 본 연구에서 수행한 물수지 및 도시화 영향분석 결과는 향후 대천 3대 하천의 생태하천복원을 위한 물순환 정상화 대책마련 및 하천의 유량확보방안 마련에 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.
- (7) 본 연구에서는 다른 요소들, 예를 들면 산림의 밀도 및 종류, 토양의 특성변화, 도로의 증가 등에 대한 사항이 도시화 영향 평가 시 고려되지 못하였다 (Kim et al., 2005). 대부분 토지 이용의 변화에 따라 토양 속성이 변화하지 않는다고 가정 하지만, 김철겸 등(2004)은 보청댐 유역에 대하여 SWAT 모형 적용 시 침엽수 및 활엽수에 따른 증발산량 및 유출량의 비교에 있어서, 침엽수가 활엽수에 비해 높은 증발산량을 가지며, 이로 인하여 유출량의 감소를 가져옴을 확인했다. 몇몇 연구에서 산림부터 초지로 변함에 따라 토양 밀도가 많게는 17%까지 증가함을 확인하였다. 하지만 Huisman et al.(2004)은 모의 연구 유역을 구성하여, SWAT 모형을 이용한 토지 이용에 따른 토양 속성의 변화에 따른 연구에서 유출성분의 민감도와 식물과 관련된 매개 변수의 불확정성의 비교에 있어서, 덜 중요하다는 결론을 내렸다. 향후, 도시화로 인한 영향을 더 세밀히 파악하기 위해서는 산림변화에 따른 영향 외에도 인구증가로 인한 지하수 사용량 변동, 지하수 흐름, 지하수-하천수 상호관계, 하수관망에 의한 영향 등을 고려해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-6-2)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환 (2006). "SWAT 모형의 다 변수 및 지역 검·보정: 갑천유역," **한국수자원학회 논문집**, 제출.
- 김철겸, 김남원 (2004). "산림식생에 따른 유역 물수지 영향 평가," **한국수자원학회 논문집**, Vol. 37, No. 9, pp. 737-744.
- 김현준, 장철희, 노성진, 김동필, 정일문, 홍일표 (2004). "청계천 유역의 수문 모니터링 및 물순환 해석," 청계천 유역 물순환 해석 국제 심포지엄, 한국건설기술연구원.
- 박민지, 권형중, 김성준 (2005). "HSPF 모형을 이용한 토지 피복변화에 따른 유출 변화," **한국수자원학회 논문집**, Vol. 38, No. 6, pp. 495-504.
- 이승중, 김영오, 이상호, 이길성 (2005). "WEP 모형을 이용한 도립촌 유역 물순환 모의," **한국수자원학회 논문집**, Vol. 38, No. 6, pp. 449-460.
- Huisman, J.A., Breuer, L., Frede, H.G. (2004). Sensitivity of simulated hydrological fluxes towards changes in soil properties in response to land use change, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 29, pp. 749-758.
- Kim, Seong Joon, Kwon, Hyung Joong, Park, Geun Ae and Lee, Mi Seon (2005). Assessment of land-use impact on streamflow via a grid-based modelling approach including paddy fields, *Hydrological processes*, Vol. 19, pp. 3801-3817.
- Luzio, M. D., Srinivasan, R., Arnold, J. G., and Neitsch, S. L. (2002). ArcView Interface for SWAT2000 Users Guide.
- Mroczkowski, M, Raper, G.P. and Kuczera, G. (1997). The quest for more powerful validation of conceptual catchment models, *Water Resources Research*, 33: 2325-2335.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. (2002). Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000.

(논문번호:06-15/접수:2006.04.44/심사완료:2006.09.12)